Revue générale des Sciences

pures et appliquées

et Bulletin de l'Association Française

pour l'Avancement des Sciences

TOME LXII Septembre-Octobre 1955 N°s 9-10

CHRONIQUE ET CORRESPONDANCE

A propos des Mathématiques intuitionnistes

Depuis les travaux de Boole et de Schröder, rappelés ici-même (t. LXII, p. 69-70), *la Logique n'est plus seulement pour la Mathématique un guide permanent aux exigences impérieuses ; elle est devenue l'inspiratrice de recherches sur les structures algébriques et sur d'autres thèmes. Comme on le sait d'ailleurs, il a fallu prendre en compte la pluralité des systèmes logiques, à partir du moment où s'est posé le problème, reconnu insoluble par Gödel, d'établir la* non-contradiction *de la Mathématique conçue sous les espèces d'un système formel. Pour sortir de l'impasse, Brouwer a voulu faire dériver* par voie constructive, *et rien qu'ainsi, les objets mathématiques de notions ultra-simples, telle la suite des entiers. Dans ce but, il a du renoncer à raisonner par l'absurde et refouler de la Logique le principe du tiers exclu : le système de Mathématique dite* intuitionniste, *ainsi amorcé, appelle donc une Logique nouvelle, et ce premier schisme en a suscité d'autres, puisqu'il existe aujourd'hui* un intuitionnisme sans négation *de Griss. Or,* dans ces conditions délicates, *et c'est important,* le rapprochement logico-mathématique se poursuit. *En cela paraît résider l'intérêt d'un ouvrage ci-dessous commenté et qui a été rédigé à la suite d'une thèse de Mathématiques (doctorat d'Etat) que son auteur a récemment soutenue. Toutefois, on est ici en terrain très complexe, et pour instruire en ce genre, il faut vraiment apporter toutes garanties, en reprenant à la base beaucoup de choses, et en particulier les définitions : n'est-ce pas déjà nécessaire pour le terme trompeur d'intuitionnisme, à la rencontre duquel on dévie souvent, attiré vers des propos du langage courant sur l'intuition, propos bien tangents à pareil débat ?*

Cette reprise indispensable de l'examen des questions à partir de leurs éléments primordiaux doit être faite, en des cas aussi typiques, avec un soin minutieux. Et cela explique les critiques pertinentes formulées ci-dessous par un de nos jeunes logiciens, M. Daniel Lacombe. Certains lecteurs qui, en ayant pris note, essaieront de dégager du texte en question les éléments essentiels qu'il peut contenir, connaîtront peut-être de la sorte un nouveau climat de travail pouvant porter fruit. (1)

G. Bouligand.

La *Collection de Logique Mathématique* vient de s'enrichir d'un exposé général de l'intuitionnisme, du à M. A. Heyting. Ce traité permettra sans doute aux lecteurs français de mieux comprendre un ouvrage de Mlle N. Dequoy sur l'*Axiomatique intuitionniste sans négation de la Géométrie projective* (2), antérieurement paru dans la même collection. Néanmoins, pour apprécier entièrement la portée du travail de Mlle Dequoy, il faudrait l'appui d'un exposé complet et cohérent de l'« intuitionnisme sans négation » tel que l'a conçu M. Griss (3). Un tel exposé aurait du, semble-t-il, précéder une monographie aussi spécialisée que cette Axiomatique de la Géométrie projective, qui suppose d'ailleurs connus les principes et les résultats généraux ultilisés.

L'ouvrage de Mlle N. Dequoy comprend, il est vrai, une introduction où sont brièvement exposés les fondements et les méthodes de l'intuitionnisme ordinaire et de l'intuitionnisme sans négation. Mais une telle brièveté, alors qu'il s'agit d'un domaine aussi mal connu (au moins en France), donne à cette introduction un caractère sommaire (4) qui souligne l'ambiguïté traditionnelle des conceptions intuitionnistes.

---

(1) Pour ce qui touche aux Mathématiques intuitionnistes, voir dans la collection de Mme P. Destouches-Février l'excellent ouvrage de Beth, analysé ici-même, p. 71-73.

(2) Dequoy (Nicole). — *Axiomatique intuitionniste sans négation de la Géométrie projective.* — 1 vol. 16 × 25 de 108 pages, avec figures. *Collection de Logique mathématique - Série* A (Monographie réunies par Mme Destouches-Février). Gauthier-Villars (Paris), E. Neuwelaerts (Louvain), éditeurs, 1955.

(3) L'auteur de l'ouvrage renvoie aux articles suivants : G. F. C. Griss, *Negationless intuitionistic mathematics.* Kon. Ned. v. Wet. Amsterdam. Proceedings 49 (1946) et 54 (1951).

(4) C'est ainsi que le caractère « contradictoire » du principe du Tiers-exclu (donc aussi de toute la mathématique classique, qui est fondée sur ce principe) est démontré en six lignes (p. 6, l. 6-11) ; mais le contexte montre que « contradictoire » est pris au sens de « en contradiction avec les idées de M. Brouwer sur le continu », ce qui diminue considérablement la portée de l'affirmation. Dans le même passage, l'expression « infinité d'assertions » signifie en réalité « assertion portant sur une infinité d'objets » (en logique symbolique : formule dont le premier terme est un quantificateur universel) ; ce n'est d'ail-

On sait que l'Intuitionnisme, tel que l'a conçu M. Brouwer au commencement de ce siècle, se présente à la fois de trois façons différentes : d'une part comme une philosophie générale de la connaissance mathématique et de son objet (5) ; d'autre part comme un certain ensemble d'exigences logiques (au sens intuitif du terme), c'est-à-dire comme une *réduction* opérée sur le domaine des notions et des propriétés admises comme évidentes ; enfin comme un système formel particulier se distinguant de la logique symbolique habituelle par la modification de certaines règles et de certains axiomes.

Le premier de ces aspects — l'aspect philosophique et doctrinal — a quelque peu vieilli depuis l'époque où des polémiques célèbres, mais aujourd'hui bien dépassées, lui ont donné naissance.

Les deux autres aspects, au contraire, conservent tout leur intérêt. Les exigences du type intuitionniste sont aujourd'hui en vigueur (sous une forme même renforcée) dans une grande partie des études mathématiques consacrées aux systèmes formels (études qu'on groupe souvent sous le nom de *métamathématique* ou de *syntaxe* desdits systèmes (6). Quant à la logique symobilque

---

leurs là qu'un exemple de la confusion perpétuelle qu'établissent la plupart des textes intuitionnistes de vulgarisation entre le domaine « mathématique » et le domaine « métamathématique » (en réalité, la notion même d' « assertion » constitue à la fois la clef-de-voûte et l'ambiguïté fondamentale de la philosophie intuitionniste).

(5) D'ailleurs la principale caractéristique de la doctrine intuitionniste est de refuser toute existence à l'objet mathématique indépendamment de la connaissance que le mathématicien peut en avoir. Ce qui peut s'interpréter de deux façons : ou bien le mathématicien est considéré dans sa réalité concrète, individuelle et sociale, et alors la mathématique se dissout dans une *psychologie des mathématiques* ou dans une *histoire des mathématiques* ; ou bien on fait intervenir un « mathématicien théorique » abstrait (un Eidos de mathématicien), et alors la mathématique devient une *métaphysique* (au sens strict du mot quand on opère franchement, au sens péjoratif lorsque on se contente — comme c'est souvent le cas — d'introduire dans le texte mathématique un certain nombre de notions vagues comme « démonstrabilité », « libre choix », « discernabilité », etc...). L'intuitionnisme, en tant que doctrine, procède au fond d'un idéalisme au moins aussi naïf que le « réalisme » de Russell (peut-être, d'ailleurs, faut-il voir là les deux faces d'une même attitude). Mais la logique symbolique actuelle (c'est-à-dire l'étude des systèmes formels) est totalement indépendante de la philosophie de Russell (comme d'ailleurs de toute autre philosophie). Tandis que la partie positive et technique de l'intuitionnisme semble encore entravée (tout au moins dans sa forme) par les multiples séquelles de vieux problèmes épistémologiques mal posés.

(6) Un système formel n'étant pas autre chose qu'une structure mathématique d'un type très simple (sous-ensemble particulier de l'ensemble de toutes les suites finies formées avec un ensemble donné, fini ou dénombrable, d'objets quelconques), l'étude intuitive d'un système formel constitue une branche particulière (fort restreinte) de la mathématique intuitive. Suivant que le domaine d'intuitions pris comme base de cette mathématique intuitive est plus ou moins restreint, on obtient la syntaxe « constructionniste et finitiste » (qui peut servir de « fondement » au calcul formel ou bien au contraire une syntaxe « ensembliste » beaucoup plus large.

intuitionniste, elle a fait l'objet de nombreux travaux, en particulier de la part de Gödel et de Gentzen.

Mais le mélange de ces trois points de vue opère sur le lecteur le moins prévenu un effet exactement opposé aux buts essentiels de l'Intuitionnisme (avec ou sans négation) : la rigueur de l'exposé, loin d'être renforcée, est au contraire anéantie par le caractère imprécis de notions comme celles d'« entité mathématique », « suite infinie de choix libres », « proposition démontrable », « propriété déterminée », « supposition réalisable », « éléments discernables », etc... ; et au lieu de se rapprocher des « intuitions fondamentales », on aboutit à des énoncés dont le sens ne semble plus correspondre à aucune espèce d'intuition.

Pour dissiper cette impression et rendre accessibles les résultats que doit contenir un travail comme l'*Axiomatique intuitionniste sans négation de la géométrie projective* (et aussi pour discerner en quoi, exactement, ces résultats se distinguent des théorèmes élémentaires bien connus sur la géométrie projective classique, axiomatique ou non), il faudrait beaucoup d'explications préalables définissant nettement le point de vue où l'on entend se placer et le sens précis de tous les termes employés.

Nous espérons d'ailleurs que cette lacune sera comblée et que l'intuitionnisme sans négation sera bientôt présenté au public français sous une forme rigoureuse et générale. Alors seulement, les recherches de Mlle Dequoy seront-elles largement accessibles.

D. Lacombe.

LA SYNTHÈSE NOUVELLE DE LA RELATIVITÉ ET DES QUANTA

par O. COSTA DE BEAUREGARD

Lorsqu'en 1925 M. L. de Broglie, en publiant sa *Mécanique ondulatoire*, inaugura la nouvelle théorie des quanta qui allait se substituer à celle des Planck et des Bohr, l'on crut que la grande synthèse entre la relativité restreinte et la théorie des quanta était acquise du même coup. De toute évidence, en effet, cette théorie accomplissait les tendances profondes de ses deux illustres aînées. Elle actualisait la synthèse entre optique et dynamique, déjà virtuelle à la suite de celle entre optique et cinématique due à Einstein, et de la présence en dynamique relativiste de la constante c ; elle rendait universelle l'association des ondes et des particules découverte par Einstein sur l'exemple de la lumière et, en faisant jouer cette équivalence dans le cas des ondes stationnaires, elle identifiait les valeurs discrètes de l'énergie quantifiée à des fréquences de résonance. Filles l'une et l'autre de l'optique — microoptique de l'émission-absorption d'une part, optique cinématique de l'autre — les deux grandes théories nées avec le siècle semblaient, en 1925, devoir en effet se reconnaître sœurs au nom, précisément, de l'optique. Nous ne saurions mieux résumer le sentiment de confiance qui alors prévalait qu'en citant M. L. de Broglie, d'après son livre *Matière et Lumière* : « La théorie de la relativité constitue en somme le couronnement de l'ancienne physique macroscopique tandis qu'au contraire la théorie des quanta a surgi de l'étude du monde corpusculaire et atomique. Etant si différentes d'origine, il n'est pas surprenant que leur conciliation exige un sérieux effort. A l'heure actuelle, si peu de temps après le développement tumultueux des doctrines quantiques, il est naturel que cette conciliation ne soit pas encore faite d'une manière satisfaisante ».

Je me propose, aujourd'hui, de montrer que la théorie de 1925 de M. L. de Broglie était bien la clé, je ne dis pas seulement de la conciliation, mais bien de la synthèse entre la relativité restreinte et la théorie des quanta. Les éléments, alors mal assimilés, qui avaient manqué pour que la fleur brillamment éclose s'accomplisse en un lourd fruit étaient ceux-là mêmes que l'ancienne théorie des quanta venait d'acquérir en parvenant à son terme : l'une et l'autre des deux statistiques quantiques, celle de Bose-Einstein et celle de Pauli-Fermi-Dirac ; la notion du « spin » des particules élémentaires selon Uhlenbeck et Goudsmit. Ce sont ces notions que le formalisme de la nouvelle théorie des quanta des Heisenberg-Schrödinger allait devoir faire siennes, avec Dirac-Fock et Wigner-Jordan en ce qui

concerne la théorie « superquantifiée » des nouvelles statistiques, avec Pauli en ce qui concerne la théorie quantifiée du spin, avant de pouvoir devenir covariante relativiste en son tréfonds ; c'est ce qu'ont mis en évidence, de 1946 à 1950, les magnifiques travaux de Tomonaga, Schwinger, Dyson, Feynman.

On n'a peut-être pas assez souligné la cohérence interne et la majesté grandiose de la synthèse ainsi obtenue ; elles ne le cèdent en rien à celles que manifeste, en une autre direction, la théorie de la relativité générale. Nous pouvons, en 1955, contempler deux superbes monuments rivaux qui, fondés sur un soubassement identique — la relativité restreinte avec sa constante c — instituent, chacun à sa manière, une connexion essentielle entre le géométrique et le dynamique. Dans l'un de ces monuments, lorsque l'on monte à l'étage, on trouve un temple dédié à la cosmologie et à la gravifique, dont la clé de voûte est la constante universelle G de Newton ; dans l'autre monument, l'on trouve un vaste théâtre destiné aux spectacles de la microphysique, et partout frappé à l'enseigne de la constante h de Planck.

Nous n'avons pas, à l'heure actuelle, une idée unanimement acceptée de la manière dont ces deux très beaux monuments devront n'en faire enfin qu'un seul. Le fait que l'électromagnétisme soit ardemment revendiqué de part et d'autre peut être, suivant l'humeur, interprété comme un gage d'optimisme ou, au contraire, comme un aspect particulièrement agressif de l'énigme posée.

Quoi qu'il en soit, je voudrais présenter aujourd'hui le moins connu de ces deux monuments synthétiques, celui qui est consacré à la microphysique.

***

Il y a, pour commencer, toute une vaste partie de l'étage quantique ne faisant appel ni à la notion de « spin », ni aux nouvelles statistiques ; elle aurait donc pu être ouverte aussitôt après la grande découverte de M. L. de Broglie, de 1925, alors qu'en fait c'est seulement au cours de ces tout derniers mois qu'elle a été reconnue.

Rappelons que la synthèse entre optique et dynamique réalisée par M. L. de Broglie repose sur l'identification suivante entre les quadrivecteurs impulsion-énergie p_λ d'un point matériel et fréquence spatio-temporelle k_λ d'une onde plane monochromatique :

$$hk_\lambda = 2\pi p_\lambda, \quad hk_0 = 2\pi c\, m_0 ; \quad \lambda = 1, 2, 3, 4 \qquad (1)$$

h et c sont les constantes, respectivement, des quanta et de la relativité, m_0 la masse propre du point matériel, et, en notant t, m, W et ν, pour le temps, la masse, l'énergie et la fréquence, l'on a :

$$x_4 = ict, \quad p_4 = icm = \frac{i}{c}\,\mathrm{W}, \quad k_4 = 2\pi\frac{i}{c}\,\nu. \qquad (2)$$

Les autres identifications de M. L. de Broglie, historiquement fameuses, entre trajectoires et rayons, action et phase, surfaces de Hamilton-Jacobi et surfaces d'ondes, principes d'extremum de Maupertuis-Hamilton et de Fermat concernent l'approximation « géométrique » de la dynamique et de l'optique, et nous n'en parlerons pas ici.

Pour faire de la mécanique ondulatoire relativiste, il nous faut d'abord une équation d'onde covariante relativiste. Celle-ci, bien connue, a été proposée indépendamment en 1926 par plusieurs chercheurs ; c'est l'équation dite « de Gordon »

$$(\partial_\lambda^\lambda - k_0^2)\ \psi\ (x) = 0, \tag{3}$$

généralisant la classique équation de d'Alembert par l'addition d'un terme de masse propre non nulle ; elle s'obtient à partir de la formule de relativité classique :

$$p_\lambda\ p^\lambda + c^2\ m_0^2 = 0 \quad \text{ou} \quad k_\lambda\ k^\lambda + k_0^2 = 0 \tag{4}$$

au moyen de la transposition bien connue

$$p_\lambda \rightarrow \text{opérateur} - \frac{h}{2\pi i}\ \partial_\lambda \quad \text{ou} \quad k_\lambda \rightarrow \text{opérateur}\ i\ \partial_\lambda \tag{5}$$

Il faut, en outre, pour les solutions de cette équation d'onde, un formalisme covariant relativiste des intégrales réciproques de Fourier ; c'est là, en effet, la base de la théorie de la diffraction de Fresnel qui, transportée en dynamique, y engendre les célèbres relations d'incertitude de Heisenberg. Et c'est aussi la base de tout le formalisme de l'interprétation physique de la « nouvelle théorie des quanta ».

Or, le point de départ de ce formalisme covariant des intégrales de Fourier se trouve dans un mémoire de 1946, trop peu remarqué, du mathématicien Marcel Riesz. Nous avons pris la peine de développer les diverses conséquences de l'idée de Marcel Riesz ; voici les résultats que l'on obtient.

Soit $\eta\,(k) = 0$ l'hyperboloïde à deux nappes défini par l'équation (4) dans l'espace quadridimensionnel des fréquences, $d\ \eta_\lambda$ son quadrivecteur élément de volume (évidemment colinéaire à k_λ) et $d\ \eta$ le module de celui-ci, tel que

$$k_\lambda\ d\ \eta = - k_0\ d\ \eta_\lambda, \tag{6}$$

$\varepsilon(k)$ une fonction de point valant respectivement $\pm\ 1$ sur les nappes des fréquences (ou des énergies) positives et négatives (*) ; considérant d'abord un développement de la solution générale $\psi\ (x)$ de l'équation de Gordon en intégrale de Fourier quadruple, on voit aisément

(*) Pour alléger le discours, nous nous limitons aux transformations de Lorentz « orthochrones ».

que, $\zeta(k)$ désignant la solution générale de cette équation sous sa forme en k :

$$(k_\lambda\ k^\lambda + k_0^2)\ \zeta(k) = 0 \qquad (7)$$

c'est-à-dire une fonction arbitraire sur η et nulle en dehors de η, le développement de Fourier cherché est finalement une intégrale triple que l'on peut écrire

$$\psi(x) = (2\pi)^{-3/2} \iiint_\eta e^{i\,k^\lambda\,x_\lambda}\ \zeta(k)\ \varepsilon(k)\ d\eta \qquad (8)$$

Soit alors $\sigma(x) = 0$ une hypersurface quelconque du genre espace de l'espace-temps, généralisant de manière covariante (on le sait) la classique notion « d'état instantané » d'un système ; soit $d\sigma_\lambda$ le quadrivecteur, normal à σ, mesurant son élément de volume, et

$$[\partial_\lambda] = \overrightarrow{\partial^\lambda} - \overleftarrow{\partial^\lambda} \qquad (9)$$

l'opérateur dit « du courant de Gordon », différence entre les opérateurs de dérivées partielles agissant vers la droite et vers la gauche ; on montre que l'intégrale covariante relativiste

$$\zeta(k) = -\frac{i}{2\,k_0}(2\pi)^{-3/2} \iiint_\sigma e^{-i\,k^\lambda\,x_\lambda}\ [\partial^\mu]\ \psi\ (x)\ d\sigma_\mu \qquad (10)$$

est indépendante de σ, et qu'elle est la réciproque, au sens de Fourier, de l'intégrale (8).

Enfin, ψ^* et ζ^* désignant les quantités conjuguées de ψ et de ζ, et p et q numérotant des solutions différentes de l'équation de Gordon, on établit l'égalité de Parseval covariante relativiste, dont le premier membre est indépendant de σ :

$$-\frac{i}{2\,k_0} \iiint_\sigma \psi_p^*[\partial^\lambda]\ \psi_q\ d\sigma_\lambda = \iiint_\eta \zeta_p^*\ \zeta_q\ \varepsilon(k)\ d\eta \qquad (11)$$

Posons alors les définitions suivantes du produit scalaire hermitien de deux solutions ψ ou ζ de l'équation de Gordon

$$<\psi_p \mid \psi_q>_\sigma = <\psi_q \mid \psi_p>_\sigma^* = -\frac{i}{2\,k_0} \iiint_\sigma \psi_p^*\ [\partial^\lambda]\ \psi_q\ d\sigma_\lambda, \qquad (12)$$

$$<\zeta_p \mid \zeta_q>_\eta = <\zeta_q \mid \zeta_p>_\eta^* = \iiint_\eta \zeta_p^*\ \zeta_q\ \varepsilon(k)\ d\eta \qquad (13)$$

ainsi que le symbole

$$e(kx) = e^*(-kx) = \begin{cases} (2\pi)^{-3/2} e^{ik^\lambda x_\lambda}, & \text{si } k_\lambda k^\lambda + k_0^2 = 0 \\ 0, & \text{si } k_\lambda k^\lambda + k_0^2 \neq 0 \end{cases} \quad (14)$$

qui est solution de l'équation de Gordon sous ses deux formes. Les formules (8), (10), (11) deviennent :

$$\psi(x) = \underset{\eta}{<} e(-kx) \mid \zeta(k) > \quad (15)$$

$$\zeta(k) = \underset{\sigma}{<} e(kx) \mid \psi(x) > \quad (16)$$

$$\underset{\sigma}{<} \psi_p \mid \psi_q > = \underset{\eta}{<} \zeta_p \mid \zeta_q > \quad (17)$$

Nous dirons que deux solutions ψ ou ζ de l'équation de Gordon sont orthogonales si l'expression (17) est nulle. Par ailleurs, la norme physique, ou nombre d'occupation d'une onde ψ ou ζ sera :

$$n = \underset{\sigma}{<} \psi \mid \psi > = \underset{\eta}{<} \zeta \mid \zeta >. \quad (18)$$

Remarquons, en retournant à la formule (11), que le nombre d'occupation d'une onde ψ ne comprenant que des ondes planes ayant des énergies d'un même signe, a le signe des énergies ; ceci traduit l'équivalence des descriptions par particules et par antiparticules. Les circonstances sont un peu moins simples avec le ψ à plusieurs composantes des particules à spin, mais nous n'insisterons pas ici sur ce point. Remarquons aussi qu'un ψ scalaire réel représente un mélange à poids égaux de particules et d'antiparticules ; en effet, le premier membre de (18) est alors nul, et l'on vérifie aisément, en partant de (10), qu'alors

$$\zeta^*(k)\,\zeta(k) = \zeta^*(-k)\,\zeta(-k).$$

Introduisons enfin le « propagateur » de Stueckelberg-Schwinger, qui est une « fonction de Green » de l'espace-temps

$$D(x - x') = (2\pi)^{-3} \iiint_{\eta} e^{ik^\lambda (x-x')_\lambda} \varepsilon(k)\, d\eta \quad (19)$$

c'est une fonction impaire de $x - x'$ (paire en $\overrightarrow{x - x'}$, impaire en $x_4 - x'_4$), imaginaire pure, nulle à l'extérieur du cône isotrope de sommet x', partout solution de l'équation de Gordon. Sa transformée de Fourier au sens (8) est $e(-kx')$, et l'on a

$$D(x'-x') = \underset{\eta}{<} e(-kx') \mid e(-kx'') > = \underset{\sigma}{<} D(x-x') \mid D(x-x'') > \; ; \quad (20)$$

l'on déduit notamment de là que deux fonctions de x, $D(x - x')$ et $D(x - x'')$, sont orthogonales au sens (11) dès que le quadrivecteur

$x' - x''$ est du genre espace. Substituant (10) dans (8), on résout le problème de Cauchy sous la forme

$$\psi(x) = < D(x' - x) \mid \psi(x') >_{\sigma'} \qquad (21)$$

(impliquant la connaissance, sur σ', du ψ et de sa dérivée normale) avec, réciproquement

$$\psi(x') = < D(x - x') \mid \psi(x) >_{\sigma} \qquad (22)$$

Semblablement, nous pouvons définir la fonction singulière (nulle si $k' \neq k''$) :

$$D(k', k'') = < e(k' x) \mid e(k'' x) >_{\sigma} = < D(k, k') | D(k, k'') >_{\eta}, \qquad (23)$$

dont la transformée de Fourier au sens (10) est $e(k'' x)$, ce qui, par (17), permet de déduire la seconde expression (23) de la première. Substituant (8) dans (10), il vient :

$$\zeta(k) = < D(k, k') \mid \zeta(k') >_{\eta} \qquad (24)$$

En résumé, les formules (8) ou (24) donnent le développement d'une solution quelconque de l'équation de Gordon sur le système orthogonal complet des ondes planes à énergies positives et négatives ; les coefficients de ces développements sont respectivement fournis par la formule (10) et celle que l'on déduit de (24) en échangeant k et k' ; la fonction de distribution des probabilités d'occupation de ces ondes planes est le second membre de la formule (11). De même, les formules (22) ou (10) donnent le développement d'une solution quelconque de l'équation de Gordon sur le système orthogonal complet des propagateurs $D(x - x')$ attachés à une hypersurface σ' ; les coefficients de ces développements sont respectivement fournis par les formules (23) et (8) ; la fonction de distribution des probabibités d'occupation correspondantes est le premier membre de (11), avec $\sigma = \sigma'$.

Les ondes planes monochromatiques et les ondes $D(x - x')$ sont des ondes « complémentaires » au sens de Bohr. Les premières traduisent une localisation parfaite du corpuscule dans l'espace des impulsions-énergies (sur l'hyperboloïde η, bien entendu) et une absence totale de localisation dans l'espace-temps ; les secondes traduisent une localisation parfaite du corpuscule franchissant l'hypersurface σ' de l'espace-temps (toutes ses localisations passées et futures étant contenues dans le cône isotrope de sommet x') et une absence totale de localisation sur l'hyperboloïde η des impulsions-énergies (comme le montre la formule (19)).

Il y a « correspondance », au sens de Bohr, entre la notion d'onde d'univers et la notion « géométrique » de tube d'univers du genre temps, entre la notion de nombre d'occupation d'une onde d'univers

et la notion classique de nombre de trajectoires « cachées » à l'intérieur d'un tube d'univers (par exemple, du nombre de molécules enfermées dans un ballon). Il est évident que le cône isotrope contenant l'onde $D(x - x')$ est analogue à un tube d'univers du genre temps. Quant à l'onde plane monochromatique d'univers, ses rayons sont du genre temps, en vertu d'un théorème fondamental de M. L. de Broglie. Physiquement, elle est nécessairement estompée aux grandes distances transversales, car le collimateur d'où elle émane est transversalement limité dans l'espace et, dans le temps, il a commencé et finira de fonctionner (cette seconde restriction s'impose si les corpuscules considérés ont une masse propre nulle).

Le précédent formalisme contient notamment une théorie covariante relativiste des incertitudes de Heisenberg ; trois seulement de celles-ci sont indépendantes dans le cas du corpuscule libre, car les deux quadrivecteurs x et k sont astreints à décrire des hypersurfaces. Ce formalisme permet d'étudier le problème où une onde corpusculaire tombe sur un écran plan muni d'un diaphragme qui s'ouvre et se ferme. Dans l'espace-temps, l'on a un écran plan tridimensionnel parallèle, disons, aux axes x_2, x_3 et $x_4 = ict$; le phénomène de diffraction et hachage combinés devient la diffraction d'univers d'une onde monochromatique; les deuxième, troisième et quatrième relations d'incertitude apparaissent de manière complètement homogène, et l'élégante interprétation feynmanienne des états à énergie négative comme états « d'anticorpuscules » est mise en évidence.

***

Cette théorie covariante relativiste fournit le seul cadre où la doctrine de la complémentarité de Bohr — c'est-à-dire l'interprétation essentiellement aléatoire de la théorie des quanta — soit exempte d'imprécisions et d'illogismes (vrais ou apparents).

Toute mesure quantique est préparée au moyen d'un appareil macroscopique, et nous pouvons aisément nous « payer le luxe » d'avoir un appareil en évolution : le collimateur s'allume et s'éteint, le diaphragme de l'écran plan s'ouvre et se ferme, etc... Cet appareil macroscopique en évolution, fort lourd, est un objet parfaitement déterminé de l'espace-temps de Minkowski (l'un et l'autre impliquent certainement, dans leur notion, un phénomène fort complexe de concentration statistique). Cet appareil d'espace-temps sous-tend un certain système orthogonal complet (au nouveau sens covariant (*))

(*) Notre définition de l'orthogonalité implique une intégrale triple et se réfère à des fonctions de quatre variables liées par l'équation d'onde. Nous n'avons pas recherché s'il est possible, en général, de considérer ces fonctions comme les fonctions propres d'un opérateur. Notons aussi que notre concept de l'acte de mesure est, en principe, intemporel : nous ne considérons pas qu'une mesure est effectuée dans un instant sans épaisseur (sauf, si l'on veut, dans le cas particulier des ondes $D(x - x')$).

d'ondes de l'espace-temps qui sont, elles aussi, des « objets minkowskiens ». Et l'appareil va distribuer entre ces ondes les corpuscules incidents, d'une manière essentiellement aléatoire mais qui sera, elle aussi, unanimement reconnue quant à ses résultats : les nombres d'occupation de chaque onde.

Il y a symétrie complète entre les problèmes de la prédiction et ceux de la rétrodiction : les corpuscules sortant sur une onde pure étaient aléatoirement distribués sur les ondes incidentes convergentes qui recomposent cette onde pure ; cette remarque a son application dans la théorie du « microscope de Heisenberg », où un photon est reçu en un point du plan-image et où l'on discute des relations d'incertitude dans le plan-objet. Finalement, les calculs des probabilités de prédiction et de rétrodiction utilisent respectivement les ondes divergentes, ou retardées, et les ondes convergentes, ou avancées ; cette symétrie entre avenir et passé de la théorie quantique probabiliste est mise en évidence avec le formalisme des matrices de transition, et en particulier, s'il s'agit de localisations spatio-temporelles, avec le formalisme des « fonctions de Green » de Feynman et de Schwinger. Voici une analogie classique de tout ceci : le problème du battage d'un jeu de cartes, lorsque le geste du batteur de cartes est temporellement symétrique, en sorte que rien ne distingue la scène réelle de son image par un film projeté à rebours ; les probabilités de changement de rang d'une carte sont alors les éléments d'une matrice symétrique. Naturellement, une probabilité de prédiction n'a encore cours que tant que le résultat de la mesure à venir n'est pas connu, de même qu'une probabilité de rétrodiction n'est significative que si le résultat de la mesure antérieure est oublié ou perdu.

Comme y a insisté von Neumann, toute mesure quantique doit être considérée comme l'ensemble d'une question et d'une réponse. La question est mathématiquement représentée par un système orthogonal complet d'ondes d'espace-temps, assimilées aux cases d'un damier ou aux urnes d'une collection d'urnes. La réponse est un système de nombres d'occupation de ces ondes d'espace-temps.

Si le nombre d'occupation d'une onde est nul, nous ne dirons pas du tout que l'onde est supprimée, ou effacée, par l'épreuve au résultat négatif. Nous dirons qu'elle est inoccupée ou vide. *Zéro* est aussi une réponse positive à sa manière.

Nous ne dirons pas non plus que la « complémentarité » entre onde et corpuscule est manifestée par la dualité de Fourier entre ondes planes et ondes $D(x - x')$: pour nous, toute mesure est onde en tant que question, corpuscule ou, mieux, nombre d'occupation en tant que réponse. La vraie complémentarité entre onde et corpuscule est, selon nous, la complémentarité entre phase et nombre d'occupation, conséquence directe du fait que le nombre d'occupation d'une onde est obligatoirement entier.

La démonstration classique de la complémentarité entre amplitude et phase se transporte aisément dans notre formalisme. Il ressort des

formules que nous avons données que $e^{i\,k^{\lambda}x_{\lambda}}$ est la matrice qui transforme réciproquement une représentation $\psi(x)$ en une représentation $\zeta(k)$ de la solution de l'équation de Gordon, et de même que $D(x' - x'')$ est la matrice transformant une représentation $D(x - x')$ attachée à une hypersurface σ' en une représentation $D(x - x'')$ attachée à une σ'' ; les carrés des modules de ces éléments de matrices contiennent les différences des arguments des coefficients qu'elles mettent en relation. Il suit de là que si une mesure reste virtuelle, ainsi par conséquent que les nombres d'occupation qu'elle aurait permis de fixer, les différences de phases de ses ondes sont au contraire actuelles ; mais, si cette mesure est effectivement faite, les nombres d'occupation deviennent actuels, tandis que leurs probabilités *a priori* sont effacées en même temps que les relations de phase.

Il est très important de noter que cette argumentation (classique) repose uniquement sur le caractère entier des nombres d'occupation ; elle peut être faite avec un seul corpuscule au total, donc aussi bien (contrairement à un préjugé répandu) avec un « fermion » qu'avec un « boson ». Remarquons aussi que c'est dans la complémentarité entre amplitudes et phases que réside le classique « tabou » obligeant à éclairer un appareil interférentiel au moyen d'une source unique : l'incohérence des phases est inévitable avec un montage qui permettrait de contrôler les intensités relatives des faisceaux portant des nombres d'occupation petits (*).

Voici alors trois exemples, d'ailleurs classiques, choisis de manière à illustrer les traits caractéristiques de l'interprétation que nous proposons. Tout d'abord, celui avancé par Einstein au conseil Solvay de 1927. Une onde, quasi sphérique, est diffusée par une ouverture très petite d'un premier écran plan, et le corpuscule unique qu'elle porte est reçu en un quasi-point d'un second écran parallèle au premier. Ici, nous citerons Bohr : « La difficulté apparente, qu'Einstein ressentait avec tant d'acuité, consiste en ce que si l'électron est reçu en un point A de la plaque, il est tout à fait exclu d'observer un effet de cet électron en un autre point B (de la plaque), alors que les lois ordinaires de la propagation des ondes ne contiennent rien qui explique une pareille corrélation ». C'est qu'en effet, pour rendre compte de ce phénomène, le classique concept *onde* ne suffit pas, et qu'il y faut ajouter celui du *nombre d'occupation* discret de cette onde. Voici alors la grande différence entre notre énoncé de la doctrine de la complémentarité et celui d'inspiration bohrienne classique. Nous ne considérons pas du tout que le corpuscule *est* un point matériel caché quelque part dans l'onde ; pour nous, le caractère quasi-ponctuel de l'impact sur le second écran est une propriété non du corpuscule,

(*) La relation d'incertitude entre phase et nombre d'occupation est de la forme $\Delta\Phi.\Delta n \simeq 1$; mais la grandeur qui limite la perfection de l'interférence est $\Delta\Phi . \Delta n/n$. C'est ce qui explique qu'avec des ondes de « bosons » à très grands nombres d'occupation, comme en radiotechnique, les interférences sont effectivement réalisables avec des faisceaux de sources différentes.

mais de l'écran. Celui-ci, en effet, est formé d'une mosaïque de grains indépendants qui sont, si l'on ose dire, de très petits objets macroscopiques, concentrés chacun dans un petit domaine de l'espace ; ce sont les carreaux de la mosaïque ou du damier. Chacun de ces carreaux sous-tend une onde convergente quasi-sphérique, et l'ensemble de ces ondes forme un système orthogonal complet, de même que la totalité des petites ouvertures virtuelles du premier écran sous-tend un autre système orthogonal complet d'ondes divergentes. Entre les deux écrans se produit une « transition » analogue au battage d'un jeu de cartes, ou à une secousse imprimée à un échiquier horizontal sur lequel est posé un petit grain : le « corpuscule » cesse d'occuper une onde du premier système et vient occuper une onde du second système. Il y a pourtant, dans notre perspective, une différence capitale entre cet exemple de l'échiquier et le phénomène quantique : pour nous, le grain ne préexiste pas plus, en tant que grain, à son impact ponctuel, qu'une image ponctuelle dans un système centré ne préexiste en tant que telle dans le faisceau focalisé, ou que les gouttes ne préexistent en tant que telles dans un compte-gouttes. Notre corpuscule n'est rien d'autre qu'un *nombre d'occupation*, valant ici *un* ou *zéro* ; il ne consiste en rien de plus qu'en la prescription d'exciter — d'occuper — une case et une seule du damier, quelle qu'en soit la forme. Cette conception, strictement phénoménologique, est celle même impliquée dans la théorie de Heisenberg, bien connue, des trajectoires à la chambre de Wilson. Notre second exemple sera celui des deux ouvertures d'Young dont l'une, à volonté, peut être masquée. Dans l'ancien énoncé de la complémentarité, l'on disait que ce dispositif transformable fait apparaître à volonté l'aspect corpuscule (en fermant l'un des trous, ce qui efface les franges) ou l'aspect onde (en maintenant ouverts les deux trous, ce qui empêche de savoir par lequel « est passé le corpuscule »). Nous considérons cet énoncé comme très vicieux. Pour nous, toute mesure est onde en tant que *question*, nombre d'occupation de cette onde en tant que *réponse*. Nous pouvons préparer deux types d'ondes, une onde quasi-sphérique, ou bien une superposition en phase de deux ondes quasi-sphériques, et rechercher si le nombre d'occupation de ces diverses ondes est *un* ou *zéro*. En d'autres termes, ce que ce dispositif transformable met en évidence, dans notre perspective phénoménologique, *c'est la complémentarité entre amplitude et phase* : nous ne pouvons pas attribuer à la fois une différence de phase déterminée et des nombres d'occupation (entiers) déterminés aux deux ondes quasi-sphériques. Si l'on nous autorise à remplacer le mot onde par celui de phase, et le mot particule par celui de nombre d'occupation, alors nous concédons que le dispositif met en évidence la complémentarité entre onde et particule...

Reprenons enfin l'écran plan à diaphragme variable déjà considéré, et supposons qu'un corpuscule unique tombe sur l'écran. De deux choses l'une, il ressort sur l'onde transmise ou sur l'onde réfléchie, avec *a priori* des probabilités aisément calculées. En langage d'espace-temps, il faut dire que, « de toute éternité », le corpuscule se trouve sur l'un des deux faisceaux. Mais *l'observateur* ne sait pas sur quel

faisceau il retrouvera le corpuscule, tant que son temps psychologique n'a pas dépassé les instants-points pendant lesquels le diaphragme est ouvert. Ici encore, nous ne faisons que mettre en lumière un point de théorie déjà connu, mais insuffisamment médité dans ses conséquences : « Quand il se produit un phénomène observable (peu importe naturellement qu'il soit ou non observé) permettant de répartir N particules entre les divers états propres correspondant à une grandeur A, les relations de phase entre composantes du développement de la fonction d'onde suivant les valeurs propres de A se trouvent, par là-même, complètement effacées » (*).

Mais le meilleur moyen d'illustrer notre conception de la complémentarité sera peut-être simplement de conter un gracieux apologue, bien moins frivole qu'il n'en a l'air.

Soit une maison de couture qui présente une collection de robes du jour et une collection de robes du soir. Les robes ne diffèrent, dans chaque collection, que par leur couleur. Chaque couleur de chaque collection peut être représentée par un nombre entier de mannequins, mais un même mannequin ne peut évidemment pas animer à la fois deux robes de couleurs ou de collections différentes. Semblablement, chaque indice de numération de deux collections d'ondes complémentaires peut être occupé par un nombre entier de particules, mais une même particule ne peut pas occuper à la fois deux ondes d'indices ou de collections différentes.

L'impulsion-énergie ou la position d'espace-temps n'appartiennent pas plus à la particule que la robe n'appartient au mannequin, ou que tel détail de la robe n'appartient à la personne du mannequin ; tout ce que l'on exige est que les ondes considérées soient, par leur équation différentielle, adaptées aux particules qu'elles portent, tout comme est exigée la « taille mannequin » (**).

Ici, l'auditeur facétieux ne manquera certainement pas de demander si c'est en vertu d'un principe que la doctrine de la complémentarité s'interdit de voir au-delà du voile, et si vraiment les mannequins ne sont visibles et identifiables que par leurs robes. Au sujet des mannequins, la théorie de la complémentarité n'a pas d'avis. Mais, au sujet des microparticules, elle affirme d'expérience que celles-ci ne se manifestent jamais autrement que comme nombres d'occupation d'une onde d'espace-temps.

(*) L. de Broglie, *Une nouvelle théorie de la lumière*, tome I, Paris, 1940, p. 214.

(**) Supposons que toutes les p minutes un mannequin et un seul quitte la scène et revienne avec une robe de l'autre collection. On retrouve, aussi bien en prédiction qu'en rétrodiction, la statistique de Fermi en supposant qu'il y a une seule robe dans chaque couleur de chaque collection, et celle de Bose en supposant qu'il y a en réserve, dans chaque couleur de chaque collection, autant de robes qu'en scène, plus une. Rappelons que ces deux statistiques sont les seules qui, avec des particules indiscernables, assurent l'équiprobabilité des transitions réciproques, c'est-à-dire aussi l'équiprobabilité en prédiction et en rétrodiction d'une même transition.

L'onde est le seul relais possible entre l'espace-temps macroscopique et la lointaine microparticule. Ce vêtement flottant est la seule manifestation par où la mystérieuse étrangère accepte d'entrer dans notre vision des choses. L'onde covariante relativiste est aussi bien le support étendu nécessaire à l'émergence statistique de l'espace-temps, que le filet nécessaire à la capture de ce qui se cache au-delà de son épaisseur d'océan.

Concluons tout ce qui précède. Notre but était d'arriver à un énoncé de la mécanique ondulatoire qui fût purement phénoménologique, entièrement covariant relativiste, totalement exempt d'ambiguités. Nous pensons y être parvenu, en ce qui concerne aussi bien la formulation mathématique que son interprétation épistémologique. C'est bien la pleine réconciliation, sans réticences, entre la relativité restreinte et la théorie des quanta « complémentariste » au sens de Bohr, telle que nous la recherchions. Et cette conciliation aurait pu être explicitée dans les années qui ont immédiatement suivi la grande découverte de M. L. de Broglie ; elle la prolonge de la manière la plus directe qui se puisse.

***

Disons à présent, en deux mots, pourquoi la prise en considération du spin et celle du formalisme de la superquantification étaient nécessaires au débrouillage complet du problème de la réconciliation de la relativité et des quanta.

Lorsqu'une particule est plongée dans un champ extérieur, et sauf dans le cas où son spin est effectivement nul et son ψ scalaire (ce qui, en particulier, n'est pas le cas de l'électron), les matrices de spin interviennent dans les termes d'interaction.

Par ailleurs, lorsque l'on utilise une équation d'onde comportant des termes de champ ambiant, tout le précédent formalisme d'intégrales triples devient caduc. Les intégrales de Fourier réciproques, l'égalité de Parseval associée, l'orthogonalité des fonctions, etc..., s'expriment au moyen d'intégrales quadruples. Par exemple, une telle intégrale quadruple apparaît immédiatement dans le cas très important du champ extérieur indépendant du temps, lorsque l'on exprime les fonctions propres de l'énergie dans l'espace des impulsions ; l'on vérifie aussi que l'orthogonalité, au sens ordinaire, de ces fonctions propres équivaut alors à l'orthogonalité au sens quadridimensionnel des fonctions propres d'espace-temps.

Or, à la fin de son beau livre de 1934 sur l'électron de Dirac, M. L. de Broglie a opposé d'avance à un tel formalisme d'intégrales quadruples l'objection qu'il exprimerait une « physique sans évolution », où tout le devenir temporel des événements serait intégré d'un coup. A cela, l'on pouvait évidemment répondre que cette vision statifiée du devenir est d'un esprit très minkowskien, et de plus en harmonie avec la quatrième relation d'incertitude. Il n'en reste pas moins que,

si l'on devait renoncer à la notion de « transition », bien des problèmes quantiques seraient non seulement insolubles, mais même informulables.

La réponse à ce redoutable dilemme a été apportée par SCHWINGER, mais seulement dans le cadre de la théorie superquantifiée. Etant données deux familles de corpuscules en interaction, deux descriptions covariantes relativistes extrêmes sont possibles. Dans la description « à la HEISENBERG », chaque particule obéit à ses équations de particule plongée dans l'autre champ ; ses « états » seront donc définis au moyen des intégrales quadruples dont il fût question. Dans ce cas, la fonction de répartition des probabilités des nombres d'occupation est invariable ; le cercle se referme avec une implacable logique, et l'on voit que c'est par essence même que la représentation de HEISENBERG est une représentation sans évolution.

Mais il y a, par opposition, la « représentation d'interaction » pure, où chaque particule obéit à ses équations de particule libre. L'interaction est alors décrite au moyen d'un opérateur lagrangien fonction d'instant-point, agissant dans l'espace abstrait des nombres d'occupation, et faisant varier la fonction de répartition de leurs probabilités, définie comme une fonctionnelle d'hypersurface du genre espace. Il s'agit alors d'une représentation avec évolution, et il est toujours possible de passer d'une description à l'autre au moyen de la transformation unitaire de SCHWINGER.

Il est possible aussi d'user de représentations mixtes, où une partie de l'interaction est décrite « à la HEISENBERG » et l'autre « à la TOMONAGA-SCHWINGER ». C'est ce que l'on fait notamment pour étudier l'émission-absorption de photons par un atome : la liaison de l'électron au noyau est décrite « à la HEISENBERG », en harmonie avec la notion de niveaux d'énergie et la quatrième relation d'incertitude, tandis que l'interaction de l'électron avec le champ des photons libres est décrite « à la TOMONAGA-SCHWINGER », en harmonie avec la notion de photons libres et celle de transition d'un niveau à l'autre.

Comme autre exemple, il y aurait la notion d'un effet STARK-ZEEMAN généralisé, avec un champ perturbateur arbitrairement variable. Si l'on s'intéresse à l'altération du spectre naturel de l'atome par le champ perturbateur, y compris l'effet de quatrième relation d'incertitude, c'est la représentation de HEISENBERG qui s'impose. Si, au contraire, on s'intéresse aux transitions induites entre les niveaux naturels de l'atome par le champ perturbateur, c'est à la représentation d'interaction qu'il faut avoir recours.

***

Sans vouloir résumer la théorie superquantifiée, covariante relativiste, de SCHWINGER et de FEYNMAN, disons simplement que la théorie de SCHWINGER « coiffe » notre précédente théorie non super-

quantifiée (*) comme le formalisme hamiltonien de la théorie superquantifiée coiffait la théorie de Heisenberg-Schrodinger. Quant au formalisme de Feynman, lui aussi très élégant, il représente la méthode effective d'écriture covariante des probabilités de transition. Son auteur l'avait trouvé au moyen d'arguments très intuitifs. Mais Dyson a montré qu'il se déduit de manière absolument régulière de celui de Tomonaga-Schwinger.

Finalement, l'auditeur nous croira sans doute si nous lui disons que l'ensemble de la théorie des quanta relativisée en sa profondeur — ce que l'on pourrait légitimement appeler « la troisième théorie des quanta » — représente une synthèse aussi cohérente, harmonieuse et puissante que l'est en son genre la relativité générale. C'est la théorie générale du prolongement en dynamique de la synthèse entre optique et mécanique posée par Einstein en cinématique et énoncée par L. de Broglie dans sa thèse fameuse ; cette théorie de l'alliance universelle entre ondes et particules présente exactement le même ordre de généralité et d'universalité que la théorie de l'identité entre masse inerte et masse grave d'Einstein. Il est saisissant de voir que ces deux grandes synthèses — celle de la microphysique et celle de l'astrophysique — admettent semblablement comme première approximation la relativité restreinte. Celle-ci est bien véritablement la pierre angulaire de toute la physique théorique actuelle.

***

Parvenue au point de conclure, notre étude se trouve confrontée à deux vastes objets, dont elle doit brièvement tracer les esquisses. L'un concerne l'antagonisme, historique, entre les deux grandes pensées de Bohr et d'Einstein sur l'interprétation de la théorie des quanta ; l'autre, le problème de la synthèse à venir entre la relativité générale et la « troisième théorie des quanta ». Prenons d'abord la première question.

C'est peut-être à propos de l'expérience fictive imaginée par Einstein, Podolsky et Rosen que les pensées respectives d'Einstein et de Bohr se sont le plus clairement opposées et exprimées. Nous ne rappellerons pas le détail technique de l'exemple discuté, car sa philosophie est la même que celle du précédent exemple où une particule tombe sur un écran muni d'un diaphragme variable. Einstein écrit en substance : « Si, sans aucunement agir sur un certain être physique (disons sur l'un des deux faisceaux séparés par le dispositif) l'on peut cependant faire une mesure (disons sur l'autre faisceau émergent) d'où résulte la connaissance exacte d'une propriété du premier être (disons, absence ou présence de la particule sur le premier faisceau, si elle a été trouvée présente ou absente sur le second faisceau), alors il existe un élément correspondant d'objectivité attaché à cet

(*) M. M. Jean ,dans sa thèse, a exposé une très solide formulation de la théorie superquantifiée, qui s'appliquerait directement à notre théorie.

être ». Nous n'avons personnellement pas dit autre chose : l'onde et son nombre d'occupation sont des « covariants » relativistes et quantiques, entraînant l'unanimité des « observateurs » relativistes aussi bien que des « expérimentateurs » quantiques.

Dans sa réponse à Einstein, Bohr concède ce point essentiel, mais ajoute que le système complet d'ondes — les cases du damier — entre lesquelles on oblige le corpuscule à opter (*) est défini par un appareillage macroscopique, entièrement déterminé en termes classiques du fait de sa lourdeur. La « complémentarité » consiste en ce qu'une même onde incidente peut être à volonté analysée en systèmes mutuellement incompatibles d'ondes émergentes.

Ajoutons que chaque mesure est pour nous un individu spatio-temporel, dont le résultat est écrit de toute éternité dans l'espace-temps quadridimensionnel. Le résultat est ce qu'il est, irrévocablement, d'avance ou après coup, bien que la relation entre données *a priori* et données *a posteriori* soit purement aléatoire. Cette physique est à la fois *essentiellement objective* comme le voulait Einstein et *essentiellement aléatoire* comme le maintenait Bohr, exactement comme dans le problème du battage des cartes.

Y a-t-il ou non des « variables cachées » derrière ces « règles du jeu de la nature », voilà ce dont une théorie phénoménologique comme celle-ci se désintéresse absolument. La célèbre démonstration de von Neumann reste intéressante en ce qu'elle explicite le contenu de certains postulats très généraux ; mais nous sommes heureux d'avoir soutenu, depuis le début, que cette démonstration ne saurait être physiquement contraignante du fait que l'on est toujours libre de croire exacte ou approchée l'adéquation de ses principes à la réalité.

***

Que faut-il penser, pour finir, de la synthèse à venir entre la relativité générale et la théorie des quanta ? Ce serait une erreur de penser que, représentant deux prolongements de la relativité restreinte, dans l'infiniment grand et dans l'infiniment petit, elles correspondent à des cas asymptotiques dont la conciliation ne s'impose pas. L'un des trois effets prédits par la relativité générale, la variation de la fréquence d'émission d'une raie atomique dans un champ de gravitation, révèle typiquement une incidence de la relativité générale sur un phénomène quantique. Le caractère absolument essentiel de cette incidence est corroboré par un argument remarquable d'Einstein et de Bohr, aussi saisissant que l'on pouvait le souhaiter. Il s'agit de la quatrième relation d'incertitude. Einstein avait cru mettre physiquement en défaut la relation d'incertitude entre le temps et l'énergie en invoquant le principe d'équivalence entre énergie et masse de la relativité restreinte : l'on peut peser la boîte d'où un photon

(*) Expression volontairement frappante, à laquelle nous n'attachons *aucune* signification métaphysique.

s'échappe à travers un diaphragme mobile, avant l'ouverture et après la fermeture de celui-ci. Fidèle au positivisme scientifique, Bohr se demande comment on va peser la boîte ; et il découvre alors que, si l'on tient compte de l'incertitude de lecture de la balance, la quatrième relation d'incertitude est rétablie *exactement*, sous la seule réserve de faire jouer l'équivalence entre masse inerte et masse grave de la relativité générale, nommément la loi de variation de l'étalon du temps dans la direction de l'accélération de la pesanteur ! Il était impossible de mettre en plus forte évidence l'unité interne de la nature que sur ce tryptique où s'articulent théorie des quanta, relativité restreinte, relativité générale.

Les deux liaisons, *a priori* si différentes en nature, entre l'aspect géométrique et l'aspect dynamique des choses, celle des incertitudes de Heisenberg et celle de la relativité générale, ne sont pas seulement compatibles dans la nature, elle y sont nécessairement liées ! Il y a là, indubitablement, un fait de première importance.

Quant au problème de savoir comment se fera la grande synthèse, qu'il nous soit permis de conter un double apologue.

La théorie d'une Terre plane est une excellente approximation pour un architecte, de même que l'est celle d'une Terre ponctuelle pour un observateur de Sirius ; il se trouve heureusement que la théorie moyenne d'une Terre sphérique est une bonne approximation de la vérité. Mais, pour découvrir la formule de Planck, il aura fallu beaucoup plus que la simple comparaison des formules asymptotiques de Rayleigh et de Wien ; il aura fallu s'élever au-dessus de l'ancien terrain du débat.

Plusieurs indices nous font penser que le vaste problème considéré pourrait ressembler bien plus au second exemple qu'au premier : l'inadéquation, reconnue par Einstein et confirmée ensuite par plusieurs essais malheureux, de l'espace-temps quasi-euclidien pour décrire la gravitation ; le caractère si singulièrement *universel* du champ de gravitation (comme du phénomène de l'inertie) devant les autres champs physiques ; l'absence de tout phénomène observé d'émission ou d'absorption de « gravitons » qui impliquerait, notamment, une chute progressive des planètes vers les soleils et l'existence d'écrans à la gravitation. Le problème de la quantification des masses propres des diverses particules et de leurs mutuelles constantes de couplage n'a pas été abordé encore avec un vrai succès.

On peut imaginer que l'équivalence qu'avait trouvée, avec d'autres auteurs, Mme Tonnelat entre la masse propre du photon et la constante cosmologique est un signe avant-coureur de relations existant entre les constantes de la microphysique et celles de la cosmologie, entre les caractéristiques des constituants élémentaires et les propriétés globales du Cosmos.

Quoi qu'il en soit, suivant leurs tempéraments, les physiciens d'aujourd'hui tendent à être soit des « quantistes », soit des « unitaires ». Aux uns conviendrait assez l'aphorisme de M. Émile Borel « L'expli-

cation statistique de la loi de NEWTON serait regardée comme un progrès » tandis que les autres suivraient plutôt le sentiment d'EINSTEIN : « Passe encore que Dieu joue aux dés, mais qu'Il y joue suivant les règles, je ne puis le croire ».

Ajoutons un dernier mot. Même les plus résolus partisans de la théorie à déterminisme caché, qui se cherche en ce moment si ardemment, ne sont pas dispensés de suivre les progrès de la théorie phénoménologique, car celle-ci, « complète » ou « incomplète », est certainement exacte. L'une et l'autre devront obligatoirement coïncider dans tout le vaste domaine qu'explore avec tant de succès la théorie phénoménologique.

BIBLIOGRAPHIE

BOHR (N.). — Discussion with Einstein, dans *Albert Einstein, philosopher scientist*, New-York, 1949, p. 224-228.

BROGLIE (L. de). — *Annales de Physique*, 3, 1925, p. 22-128.

RIESZ (M.). — *Actes du 10e Congrès des mathématiciens scandinaves*, Copenhague, 1946, p. 123-131.

TOMONAGA (S. I.). — *Progress in Theoretical Physics* 1, 1946, p. 27.

SCHWINGER (J.). — *Physical Review* 74, 1948, p. 1439-1461 ; 75, 1949, p. 651-679 ; 82, 1951, p. 664-679.

DYSON (F. J.). — *Physical Review* 75, 1949, p. 486-502.

FEYNMAN (R. P.). — *Physical Review* 76, 1949, p. 749-759 et p. 769-789.

JEAN (M.). — *Annales de Physique* 8, 1953, p. 338-391.

COSTA DE BEAUREGARD (O.). — *Journal de Physique* 15, 1954, p. 810-816 et 16, 1955, p. 770-780.

POTIER (R.). — *Journal de Physique* 16, 1955, p. 688-692.

L'Ingénieur en tant que stratège :

THÉORIES DU COMPORTEMENT

Une définition de la Cybernétique ; Applications linguistiques [1]

par **Benoît MANDELBROT**
Ancien Elève de l'Ecole Polytechnique
Docteur ès Sciences

Pour durer, les synthèses scientifiques doivent, un jour ou l'autre, passer du stade des comparaisons, qui sont toujours un peu impressionnistes, au stade des définitions. Il semble qu'il était temps de faire ce travail pour la cybernétique : c'est ce qui a été tenté par l'auteur du travail ci-dessous. Le domaine que recouvre sa définition dépasse d'assez loin celui des travaux cités par Wiener ; mais il paraît en garder l'esprit.

Introduction

Qu'est-ce que la cybernétique, dans l'usage français d'aujourd'hui ? Il est bon de se le demander, avant de tenter, comme nous allons le faire ici, de définir ce que nous *aurions* voulu que devienne cette discipline.

Il est bien clair que, rançon peut-être de son étonnant succès initial, le terme a acquis, çà et là, les acceptions les plus nombreuses, les plus larges, les plus vagues, souvent les plus sensationnelles, et presque « compromettantes ». On peut le regretter, sans d'ailleurs s'en étonner, puisque personne n'a jamais véritablement proposé de définition que l'on puisse tâcher de suivre. Mais le « standing » de la discipline n'a pas manqué de souffrir de ce désordre, et le mot lui-même paraît être passé dans une espèce de « purgatoire ».

Tandis que ceux qui travaillent effectivement à la réalisation des espoirs, illustrés par le beau livre de N. Wiener, préfèrent se réfugier sous d'autres dénominations, les seuls à oser parler de cybernétique sont tous quelque peu amateurs dans ce

(1) Conférence faite le 2 juin 1955 à l'Institut Henri-Poincaré, dans le cadre des Conférences Interscientifiques, organisées par M. G. Bouligand, Professeur à la Sorbonne.

domaine. Les plus sérieux poussent d'ailleurs la prudence jusqu'à se borner surtout à répéter, sous divers angles, des thèmes de « Cybernetics » ; et au lieu d'être source d'inspiration, cet ouvrage paraît n'être que source de citations, ce qui, d'un certain point de vue, est un sort fâcheux.

Pourtant le terme est beau et bon. De plus, nous le croyons fort utile, et il nous paraît qu'il faut essayer d'en réhabiliter l'usage, en commençant par suggérer clairement une définition bien motivée, et en montrant les réalisations que recouvre déjà cette définition. Mais, pour cela, il nous faudra dépasser le seul cadre de la synthèse de Wiener, si large qu'elle soit, car ce n'est point par hasard que celle-ci a échappé à la définition. Elle le « tient » guère, en réalité, que par la forte personnalité d'un grand savant, et elle laisse de côté maints thèmes contemporains, qui, venant d'autres horizons, convergent cependant vers le même but. De plus, il est bien évident qu'elle ne contient pas les thèmes élaborés depuis 1948, date de parution de « Cybernetics ».

Il nous paraît donc que, pour définir la cybernétique, il faut commencer par en oublier un peu l'histoire, et reprendre les idées à la base. Au risque d'aboutir à quelque chose de très étendu, il nous paraît même souhaitable de procéder de façon « structurale » et de dégager la spécificité de la cybernétique en l'opposant à d'autres disciplines mieux établies et mieux comprises. On verra ainsi, en particulier, que parmi les thèmes qui lui reviennent, doit nécessairement se retrouver, à côté de tout « Cybernetics », toute la théorie de la « décision », due à A. Wald, qui est l'aboutissement de ce qu'on appelle aussi, de plus en plus improprement d'ailleurs, la « statistique mathématique ». Cette théorie, malgré sa très grande beauté, est encore très peu connue en France ; autrement, il semble que ses liens conceptuels avec la cybernétique n'auraient pu échapper à personne. A son tour, la théorie de Wald associe intimement la cybernétique à la théorie du jeu, issue de Borel et de von Neumann. Nous étudierons un peu ces rapports. Nous ne pensons pas qu'ils doivent mener à des « conflits d'attribution » car nous considérons la théorie du jeu comme un chapitre des mathématiques, tandis que nous verrons que la cybernétique n'en est pas un, bien qu'elle fasse appel constant aux mathématiques. On peut d'ailleurs arriver à formuler simplement, en langage ordinaire, les bases mathématiques fondamentales de la cybernétique, ce qui est un signe de génie des savants qui l'ont créée. Mais il n'en est plus du tout de même du développement de ces fondements. Dans la mesure même où elle est efficace, la cybernétique, telle que nous l'entendons ici, devient rapidement fort « difficile ».

Une définition de la cybernétique

Le trait nouveau de plusieurs développements scientifiques de ces dernières décades, qui rend possible une « théorie du pilote », est le succès, simultané et indépendant, de plusieurs tentatives de *construction de théories formelles normatives du comportement inductif*. En partant de critères globaux et très simples d'optimalité, on a en effet réussi, ça e là, à « construire » rigoureusement des programmes, ou plans d'action, en face de l'inconnu, si complets et si détaillés que même un idiot ou un automate pourrait les réaliser. Le nombre et l'unité méthodologique de ces succès est tel qu'il est approprié d'en « centraliser » l'étude. Il nous parait ainsi que *le rôle de la cybernétique est d'être l'étude instrumentale et structurale de tout ce qui se rapporte à l'inductif et au normatif*.

Chacun de ces quatre termes différencie la cybernétique de quelque autre étude bien établie. Etant *instrumentale*, elle s'opposera à la *philosophie* de l'induction ; étant *structurale*, elle s'opposera aux *technologies ;* étant *inductive*, elle s'opposera aux *mathématiques ;* étant *normative*, elle s'opposera aux *sciences descriptives*. Selon que l'on considère l'auteur ou l'œuvre, *la cybernétique sera encore l'étude de l'ingénieur en tant que stratège ;* ou ce sera *l'étude normative et inductive* (de plus : *formelle, structurale et globale*) *du comportement des automates*, étant entendu que les sens un peu particuliers d'« ingénieur », « stratégie », « automate » apparaîtront par la suite, et que l'automate sera fréquemment un autre agent humain dépourvu d'initiative, et peut-être « l'ingénieur » lui-même dans la suite de son comportement.

On voit ainsi qu'il y a fort longtemps que l'on fait des études que nous appelerions « cybernétiques » ; d'ailleurs, ce n'est pas étonnant, puisqu'on sait bien que la cybernétique est avant tout une synthèse.

Que l'on accepte ou non notre définition, les problèmes que cette étude réunit garderont leur unité, et un seul terme parait utile. On aurait pu, bien entendu, défendre quelque dérivé de « téléologie », que Wiener utilisait avant d'avoir réinventé « cybernétique ». De même, pour revenir à une source plus ancienne (et sans doute universelle) c'est à ce que nous appelons cybernétique que devait songer Laplace lorsqu'il disait que la « théorie des probabilités n'est autre chose que le bon sens réduit au calcul ». Cependant, le terme de « théorie des probabilités » a pris, depuis un tout autre sens, et l'étude à laquelle songeait Laplace ne fait que se créer véritablement de notre temps.

Il nous faut maintenant analyser en détail les quatre oppositions par lesquelles nous définissons la cybernétique.

L'oppositoin entre cybernétique et mathématiques a été le plus clairement exprimée par J. Neyman, à propos des problèmes d'estimation et de test d'hypothèses. « Je veux insister » — écrit-il par exemple — « sur le fait que l'utilisation d'intervalles de confiance comporte trois phases : (i) la formulation du problème ; (ii) un raisonnement déductif donnant la solution du problème ; (iii) un « acte de volonté » pour ajuster notre comportement aux valeurs des intervalles de confiance. On a fréquemment affirmé que l'estimation statistique fait intervenir un processus mental qu'on appellerait « raisonnement inductif ». Aucune étape de cette nature n'apparait dans l'analyse ci-dessus. Les raisonnements sont déductifs et conduisent à certaines formules et à divers théorèmes. Une phase nouvelle intervient lorsqu'on essaie d'utiliser ces formules : cette phrase est marquée par un acte de volonté — non un « raisonnement ». — Ailleurs Neyman écrit : « Par comportement inductif on entend les règles, plus ou moins générales, d'ajustement de nos actions aux résultats d'observations limitées. » Nous suivrons Neyman et bien que les travaux de cybernétique soient souvent mathématiquement difficiles, nous conviendrons de ne pas faire de la cybernétique une branche des mathématiques, ni d'englober dans la cybernétique aucune branche des mathématiques (ni même la « théorie du jeu »).

(Remarquons que les résultats déductifs, qu'il faut posséder avant de se poser des problèmes inductifs, ne sont pas nécessairement obtenus par le raisonnement. Lorsque celui-ci est trop compliqué, il peut être plus facile de construire quelque machine, dont on ne connaitrait pas *a priori* le fonctionnement : en la regardant, on se révèlera des « lois de la nature » auparavant inconnues. C'est là par l'exemple le rôle de l'homéostat d'Ashby, qui n'est donc nullement une « machine cybernétique ».)

L'opposition entre cybernétique et sciences descriptives doit elle aussi être très strictement observée, et ceci malgré le caractère frappant pour l'imagination des applications de la cybernétique. Il est bien vrai que la possibilité de construire des modèles cybernétiques dans les sciences a été remarquée dès l'instant où les structures de la cybernétique étaient dégagées. Il eut d'ailleurs été étonnant que le progrès que la cybernétique apporte (ou marque) dans l'étude de problèmes techniques ne conduise pas à des progrès de la description scientifique. On sait en effet avec quelle fréquence les méthodes descriptives des sciences dérivent de solutions de problèmes techniques. Nous discuterons d'ailleurs brièvement le fondement de ces applications. Mais celles-ci n'ont de valeur que si elles s'intègrent pleinement dans les sciences correspondantes, ce qui est d'ailleurs de plus en plus le cas. La cybernétique, elle, doit rester nominative, c'est-à- différente de *toute* science descriptive.

Du caractère normatif de la cybernétique découlent du reste quelques conséquences permanentes. D'abord, elle ne sera

jamais « indiscutable », puisqu'aucun critère normatif ne peut jamais être « motivé » de façon absolue, définitive et intrinsèque. La seule justification possible d'un tel critère est en effet de mener à des résultats « raisonnables » dans des cas simples ; si on l'emploie dans d'autres cas, c'est uniquement pour être « conséquent avec soi-même ». La théorie de l'estimation montre combien il est difficile quelquefois de décider ce qui est « raisonnable ». La discussion des fondements méthodologiques de la cybernétique sort donc grandement enrichie de l'inclusion des problèmes d'estimations, apportés par la « statistique mathématique ».

Ce qui oppose la cybernétique aux technologies, c'est d'être structurale : elle idéalise suffisamment les conditions et les conséquences de la décision pour permettre d'étudier le processus de décision « en lui-même », indépendamment de ses réalisations possibles dont on doit supposer connues les quelques propriétés utiles. L'étude sera très souvent en particulier indépendante des énergies remuées par la décision, qui sont beaucoup plus considérables que celles qu'exige la décision elle-même (d'où le terme de « science des déclenchements » qui avait déjà été appliqué par Poincaré et Smoluchowski à *tous* les calculs des probabilités).

Enfin, malgré l'intérêt que la théorie de la décision présente pour le philosophe et malgré l'aide qu'elle peut apporter à la compréhension du processus général d'induction, la cybernétique n'est pas philosophie : elle commence au moment où l'on cesse de se poser des problèmes philosophiques, et où on se pose des problèmes précis de comportement.

Comme exemple de notre quadruple opposition, signalons le cas de la cybernétique du bruit, ou théorie des méthodes destinées à combattre ce dernier. Cette théorie s'oppose à la fois à la mathématique des fonctions aléatoires, à la physique des fluctuations, à la technique de la radio et à la philosophie de l'induction ; la cybernétique apporte ainsi, ici, une application pratique importante à une théorie mathématique, dont la meilleure utilisation (en physique) n'était, jusque là, qu'une confirmation éclatante de la théorie atomique de la matière, n'intéressant que certains théoriciens (tandis que, paradoxalement, l'application médiocre aux phénomènes économiques était constamment invoquée).

Les trois volets de la cybernétique

Pour des raisons de commodité, et en particulier pour séparer les différentes techniques mathématiques, l'on distingue souvent trois types d'étapes dans un problème de cybernétique.

A) représentation de l'action d'un automate au moyen d'une « fonction de décision » ou « fonction de réponse » et détermination de la « meilleure » fonction ;

B) détermination de la « meilleure » synthèse logique et topologique d'une fonction de décision déjà choisie, au moyen d'opérations élémentaires disponibles ;

C) détermination des « meilleures » pièces détachées, ou opérations élémentaires.

Ces étapes peuvent d'ailleurs entrer dans des hiérarchies complexes, ce qui est « décision » pour un problème étant « pièce détachée » pour un autre problème ; le « niveau » des étapes ci-dessus est donc très indéterminé. Dans la plupart des cas, la théorie de A) a été beaucoup mieux formalisée que celle de B) et encore plus que celle de C).

A) *Détermination des fonctions de décision.*

Reportons-nous à l'introduction de « Cybernetics ». On constate que l'un des points de départ de la synthèse de Wiener a fait précisément le rapprochement entre plusieurs exemples de cas où l'on a réussi, au cours des années 1940, à poser des problèmes « techniques » de télécommunications en termes scientifiques, pour les résoudre ensuite par des méthodes usuelles de recherche de maximum ou de minimum.

Quelle est l'inconnue de ces problèmes ? C'est ce que les ingénieurs, qui ne craignent pas le verbalisme, appellent la « fonction de réponse » du « maillon humain » ou d'un automate. Si l'on se représente un automate comme une boîte fermée, avec des entrées et des sorties, la fonction de réponse est la correspondance abstraite qui existe entre entrées et sorties ; c'est ce que l'on peut savoir de l'automate sans l'ouvrir, donc c'est ce qui sera connu de l'exécutant entre les mains duquel on met la boîte, et à qui toute improvisation est interdite.

Le choix de la fonction de réponse est l'une des tâches de « l'ingénieur ». Il doit le faire « au mieux », en tenant compte de l'« émetteur » des fonctions d'entrée, dont l'automate sera le « récepteur ». Pour pouvoir se ramener aux problèmes variationnels dont il parle, il faut à Wiener faire des hypothèses très spéciales sur sa connaissance de cet émetteur : il suppose en fait que le message est une fonction aléatoire, sans discuter en détail la signification de cette hypothèse. La position dans laquelle Wiener place son ingénieur est donc exactement celle du statisticien aux beaux jours de l'application indiscutée de l'axiome de Bayes. Un jour, comme le statisticien, l'ingénieur aurait dû arriver à la discussion de cet axiome : par chance, il n'aura pas à le faire tout seul, un bon bout de ce travail ayant déjà été fait par le « statisticien ».

Le « statisticien » avait poursuivi une évolution parallèle à celle de l'ingénieur de Wiener, tout à fait indépendante, et à certains égards plus rapide. Rompant dès le début du siècle avec

l'étymologie, il avait cessé d'être le collectionneur de données numériques relatives aux Etats. Puis, avec R.-A. Fisher, J. Neyman et finalement A. Wald, il avait cessé d'être celui qui « indique ce qu'on peut dire » en face de données en partie inconnues, pour devenir « celui qui indique ce qu'on doit faire ». De plus, dans la confection de ses « recettes », il passait, lui aussi, du stade de l'inventeur, au stade où la meilleure correspondance entre ce qui est connu et l'action peut être donnée par la solution d'un problème mathématique d'optimum. Donc, étymologiquement parlant, il devenait déjà « cybernéticien ». Pour cela, le statisticien introduisait lui aussi une correspondance abstraite entre entrées et sorties. Par purisme behaviouriste et opérationnel, et pour éviter les connotations verbales de « réponse », il l'appelait « la fonction de décision » de son problème.

(Un problème typique de cette « statistique » est celui qui consiste à dire, sur la base d'études d'un certain nombre d'échantillons, s'il faut accepter (Décision D_1) ou rejeter (Décision D_2) un lot d'objets fabriqués, ou s'il faut exiger de nouvelles expériences (Décision D_3). La sortie est une fonction à trois valeurs possibles : D_1, D_2, D_3, — de l'entrée : mesures des échantillons.)

Ces développements du statisticien et de l'ingénieur ne pouvaient manquer de se rencontrer un jour, aussi bien parce qu'on a besoin de la « statistique » en communication, que parce qu'il n'y a pas de différence entre les acceptions les plus larges de « fonction de décision » et de « fonction de réponse ». La rencontre est désormais chose faite dans beaucoup de travaux. Préférant le terme introduit en statistique, nous dirons que *la première tâche du cybernéticien est de choisir ce qui déterminera la « meilleure » fonction de décision, pour agir en présence d'un inconnu, relatif au présent ou au futur, à un adversaire réel ou à un inconnu impersonnel.*

Au concept abstrait de fonction de décision, la cybernétique associe, de façon assez originale, deux conditions concrètes.

Tout d'abord, aucune opération ne doit rester « mentale » : toutes doivent se traduire par une pièce d'équipement. Donc, le cybernéticien, comme ingénieur en tant que stratège, est nécessairement « behaviouriste », « opérationaliste ». Seulement, ce n'est plus chez lui une attitude philosophique critique *a posteriori :* c'est *une méthode pour poser les problèmes en vue de leur solution.*

Par ailleurs, le cybernéticien est soumis à la nécessité d'un « bilan ». Il doit estimer le coût : a) de chaque pièce d'équipement ; b) de son fonctionnement normal ; c) de toute consé-

quence fâcheuse d'une décision incorrecte, que celle-ci soit admise délibérément pour simplifier le matériel ou qu'elle soit due à des raisons intrinsèques (par exemple, l'impossibilité de connaître exactement un tout à partir d'échantillons). (V. Neumann et Morgenstern ont montré qu'il existe très généralement une « utilité » qui peut servir d'échelle aux divers coûts.)

Toutefois, les conditions d'opérationnalisme et de bilan ne sont pas les plus difficiles à satisfaire : la principale difficulté pour le cybernéticien est de décider comment tenir compte des propriétés de l'« émetteur » inconnu des variables d'entrée de la fonction de décision. Nous remettons à plus loin cette discussion, qui est très délicate. Signalons seulement déjà que Wald a suggéré de personnifier dans tous les cas cet émetteur comme « nature », et de considérer la suite des valeurs des entrées comme résultant d'une « stratégie » délibérée. Le problème de la décision est alors ramené à un « duel » entre le cybernéticien et la nature, dont il faut déterminer les règles les plus « raisonnables ». Suivant les cas, la meilleure stratégie du premier sera donnée par un maximum simple ou va exiger des concepts de la théorie du jeu de von Neumann (c'est-à-dire d'une théorie des « cols », au lieu d'une théorie des « sommets »).

A côté de l'idée de recherche mathématique de la meilleure fonction de réponse, Wiener introduit un *concept d'information* qui a cristallisé l'attention de façon étonnante et qui a conduit à beaucoup d'erreurs. Nous y reviendrons plus loin. Signalons cependant tout de suite que bien d'autres concepts d'information très divers doivent être introduits pour exprimer les conditions et les résultats d'une décision. Pour ne pas risquer d'être entraîné par les sens vagues du terme « information », et pour comprendre les applications psychologiques de ces concepts, il est bon de toujours tenir présent à l'esprit le problème de décision qui forme le contexte de l'information particulière dont on parle. Sinon, l'introduction d'une information deviendra, avec une grande facilité, l'occasion d'une rupture avec le concret, et même de problèmes dépourvus de sens.

D'ailleurs, l'analogie entre les divers concepts d'information de la communication et de la statistique traduit un lien puissant entre les divers problèmes cybernétiques, historiquement tout à à fait distincts, de diagnostic, estimation, test, tri, etc... Ce lien apparaît bien dans l'axiomatique de M. P. Schutzenberger (cf. un article paru dans cette même revue, n° 7-8, 1955, pp. 222-226).

B) *Synthèse des fonctions de décision.*

Dans la recherche de la fonction de décision, il est, le plus souvent, impossible de tenir compte de toutes les conditions du problème. Une fois la fonction de décision obtenue, se posera donc encore un problème, tout différent, de *synthèse* de la

fonction globale au moyen d'opérations élémentaires disponibles. *La deuxième tâche du cybernéticien sera de construire une « logique synthétique » ou « instrumentale », qui permette d'obtenir la synthèse « optimale »*. (Ex. : synthèse de filtres, de réseaux de commutation ; programmation d'une machine à calculer, etc...).

Nous parlerons peu de la synthèse dans ce travail, bien que (ou parce que) ce sont les succès de la synthèse dans le domaine électronique qui ont le plus étonné dans la cybernétique. D'ailleurs, la plupart des questions philosophiques posées au sujet de la synthèse n'ont en réalité de sens qu'à propos du problème de la décision.

C) *Pièces détachées.*

Le problème de synthèse est lui-même posé en supposant qu'on a déjà des pièces détachées standardisées. Or, il est souvent possible de choisir entre plusieurs genres de pièces. (Par exemple : des relais, des diodes, des triodes, etc..., sous leurs représentations algébriques : trait de Scheffer, etc...). *La troisième tâche du cybernéticien sera de fournir des critères de choix des meilleures pièces détachées.* (En se gardant bien de devenir électronicien.)

La théorie des pièces détachées comporte un résultat inattendu et encore très discuté : la nécessité fréquente d'inclure parmi les « pièces détachées » une source de hasard, indépendante des entrées. La meilleure fonction de décision doit en effet souvent être non pas un « acte pur, mais un acte mixte » : choix au hasard, avec des probabilités déterminées, entre plusieurs actes purs déterminés (randomisation en statistique). La recherche d'un « but » (téléologie) ne parait donc pas être incompatible avec le besoin d'utiliser le hasard.

Applications de la cybernétique à la description scientifique

Etudiant les fonctions de machines, la cybernétique ne pouvait manquer d'attirer l'attention sur les fonctions correspondantes des êtres vivants. Mais, en fait, l'ambition des « applications » de la cybernétique a été en apparence plus grande, et elles ont voulu étudier les similitudes entre automates et êtres vivants. Nous ne pouvons discuter en détail de ce procédé, et nous bornerons à signaler la difficulté conceptuelle que soulève une différence essentielle entre les choses comparées.

Ce qu'on a en effet, c'est, d'un côté, un organisme dont le type est unique ou possède tout au plus quelques variantes discontinues ; de l'autre côté, on a un automate, dont l'étude est absurde si on ne considère pas l'infinité de ses variantes concevables, et dont le choix a ou bien été fixé par des limitations de l'imagination d'un inventeur, et des critères peu formalisés, ou bien a été fait à partir d'une formalisation complète, suivie de

déductions mathématiques ; ou bien encore fait par un mélange de ces deux procédés extrêmes.

Le plus intéressant pour nous, c'est la comparaison d'êtres vivants avec des automates dont la théorie est parfaitement normalisée. Une telle comparaison recèle-t-elle inévitablement une idée de « perfection » et de « stabilité » des organismes vivants ? En réalité, elle n'exige pas l'attribution à un Créateur de nos propres critères de qualité, donc de nos idées sur la façon d'être conséquent avec soi-même : en effet, les principes de « meilleure décision », de « meilleure synthèse », peuvent parfaitement bien conserver l'interprétation impersonnelle qu'on a donnée aux critères de « moindre action » de la mécanique analytique ; tout l'apport de la cybernétique se réduirait alors à un enrichissement de la variété des modèles variationnels possibles, et ces modèles ne se justifieraient que si des critères peu nombreux « expliquent » des comportements nombreux et en apparence hétéroclites. On tente, par exemple, d'obtenir des modèles du comportement psychologique et économique en se basant sur des « fonctions de décision » très formalisées.

Par contre, la synthèse de ces machines à calculer est très peu mathématisée, et la comparaison du cerveau à une machine à calculer ne fait intervenir aucun modèle variationnel.

De toutes les façons, loin d'être ambitieux, le postulat d'application de la cybernétique est un aveu de grande faiblesse (et il est déjà étonnant que l'on ait réussi à faire des progrès de cette façon). Comparer ce que l'on ne connaît pas à ce que l'on connaît, est le mieux que l'on puisse faire sans risquer de violer les conditions d'opérationalité et de coût et de tomber dans l'invérifiable ou l'absurde. Il faut donc se résigner à étudier l'être vivant comme on le ferait d'un outil préhistorique dont on a perdu toutes les variantes.

Autres théories structurales

Par leur caractère *structural*, commun à diverses réalisations, les théories de Wiener, de von Neumann et de Wald participent toutes trois à un mouvement d'idées beaucoup plus vaste, auquel paraissent aussi participer, plus ou moins indépendamment les unes des autres, toutes les principales entreprises scientifiques de notre temps. S'étant ainsi généralisé, le structuralisme a d'ailleurs quelque besoin d'une clarification générale.

La communication comme jeu

Les définitions ci-dessus restent sans portée, tant qu'on n'a pas explicité des critères d'optimum, et elles restent peu claires tant qu'on n'a pas fourni d'exemples. Pour montrer l'unité de la cybernétique, nous allons donc prendre un exemple en théorie de la communication : un problème de réception des messages,

et le formuler au moyen du schéma introduit par A. Wald pour les problèmes d'estimation de paramètres.

Considérons donc un récepteur ; son objet est de « détecter » le message reçu, c'est-à-dire de l'identifier à l'un des messages d'un catalogue qu'il possède dans sa « mémoire ». Pour que la communication soit utile, il faut qu'il y ait plus d'un seul message possible. Supposons les messages décomposables en « mots » et l'ensemble des mots « structuré », c'est-à-dire supposons que chaque mot puisse être identifié en constatant son appartenance à une série de sous-ensembles du catalogue. Chaque appartenance à un sous-ensemble sera constatable par des « expériences » sur le support physique du mot, et le nombre de sous-ensembles pour chaque mot sera très surabondant, de telle sorte que le récepteur ait le choix entre plusieurs programmes différents d'identification.

Si l'identification reste incomplète (soit qu'on en décide ainsi, soit qu'on ne puisse faire autrement), la décision prise par suite de la réception sera quelquefois incorrecte ; la gravité de chaque erreur possible sera estimée à l'avance au moyen d'une fonction de coût. De même, on attribuera un coût à chaque opération d'identification.

On se pose alors simultanément les problèmes A) et B) de la recherche de la fonction de décision et de sa synthèse, étant donné les expériences possibles. On cherche donc à réaliser, en ce qui concerne le récepteur, le meilleur compromis entre économie et exhaustivité de diagnostic. Pour cela, on remarque que le coût total du diagnostic dépend à la fois du programme lui-même et du « programme d'émission » de la source des messages, et on considère ce coût comme l'enjeu *d'un jeu entre récepteur et émetteur*. (C'est d'ailleurs là un enjeu étrange, tout « négatif » ; il aurait été souhaitable de mesurer ainsi ce que « gagne » le récepteur en diagnostiquant, et qui devrait être une espèce d'« information » ; mais cette partie « gain » de l'enjeu est sans influence sur les critères principaux de diagnostic, et sa détermination peut être remise à une place ultérieure, où elle sera plus facile).

La seule règle intrinsèque de choix des stratégies par le récepteur est une règle toute négative : il n'a pas besoin de considérer une stratégie comme « admissible » s'il en existe une autre qui n'est plus chère avec *aucun* émetteur et qui est moins chère avec *au moins un émetteur*. Les stratégies qui restent après cette élimination forment ce qu'on appelle une « classe complète ». On ne peut aller plus loin sans introduire des *normes inductives arbitraires* de comportement. La norme classique, due à Bayes, remonte à 1763 (la statistique moderne cherchait désespérément à s'en débarrasser au moment même où la théorie des communications l'adoptait. La seule norme que l'on ait proposée depuis lors, qui ait une généralité compa-

rable à celle de Bayes, est la norme minimax. Nous définirons ces normes et essaierons de montrer dans quelle mesure elles sont « raisonnables ». Le coût de décodage, Bayes ou minimax, servira alors à introduire le concept d'information de Hartley-Shannon-Wiener, qui permettra d'énoncer, plus loin, une troisième norme dite de « minimin », utile pour la construction d'un modèle *descriptif* des textes naturels.

Norme minimax

Supposons donc d'abord que l'on ne connaisse rien du message, sauf le catalogue des mots. (On sait par exemple que le message est tapé sur une machine à écrire française, mais sans connaître la langue utilisée, nos « mots » étant ici les « lettres » de la machine.) Il se peut alors que, quelle que soit la stratégie choisie par le récepteur, celui-ci ait à l'appliquer précisément au message qui maximise l'enjeu-coût pour cette stratégie. Dans ces conditions, un désir de « polyvalence » de la machine conduit à *la norme minimax, qui recommande de choisir le programme de réception pour lequel le maximum possible de coût est aussi petit que possible,* c'est-à-dire de « prendre ses précautions » en supposant que ce qui est inconnu est aussi défavorable que possible.

Si donc C (R, E) est le coût par mot pour les stratégies d'émission et de réception E et R, on recommande de choisir R° pour lequel on atteint $C^\circ = C(R^\circ, E^\circ) = \max_{(R)} \min_{(E)} C(R,E)$, donc tel que tout tout $R \neq R^\circ$, $E \neq E^\circ$, l'on ait : $C(R^\circ, E) \leqslant C(R^\circ, E^\circ) \leqslant C(R,E^\circ)$: le point $(R^\circ, E^\circ, C^\circ)$ est alors une « selle », un « col » de la *surface de coût* C(R,E). On montre que très fréquemment la réception minimax doit comporter la pièce détachée : « source de hasard indépendante du message ».

Du point de vue mathématique, les problèmes de minimax constituent donc une généralisation, très naturelle, de problèmes de maximum ou de minimum, mais cette généralisation introduit de très grandes difficultés mathématiques, en particulier des difficultés de calcul explicite de la « solution ». (Remarquons qu'on obtient quelquefois à peu près la même solution R° pour toutes sortes de fonctions de coût toutes « raisonnables », mais différentes les unes des autres.)

La norme minimax modifie de façon radicale, et un peu paradoxale, le caractère de la confrontation entre l'ingénieur actif et la nature, inconnue mais neutre. On voit en effet que le problème que pose réellement cet ingénieur est intermédiaire entre le vrai conflit contre un adversaire malveillant et habile et les problèmes de maximum simple qui se posent en face d'un « adversaire » connu. Or, en faisant la liste exhaustive des programmes de diagnostic ouverts à l'ingénieur, et en lui fixant une fonction de coût, on transformera cet ingénieur en

machine (polyvalente) tandis que, par ailleurs, on personnifiera l'« inconnu » en lui attribuant la facilité anthropomorphique de choisir de contrer les désirs de l'ingénieur, quels qu'ils soient.

Il ne faut pas prendre trop littéralement, ni cette inversion des rôles, ni l'aspect « malveillant » de l'émetteur minimax. En un sens d'ailleurs, on considère plutôt cet émetteur comme « bienveillant », puisqu'il se révélera être celui qui aurait apporté le plus d'information au récepteur. Si l'on veut quand même discuter de plus près le problème du minimax en cybernétique, on ne peut manquer de rejoindre les discussions des théologiens, si anciennes qu'on ne peut guère en espérer l'aboutissement prochain, sur l'« essence du mal ». Renvoyons par exemple à saint Augustin, qui dans sa critique du manichéisme oppose aux démons zoroastriens et manichéens, dont l'essence est de chercher à nuire, les démons judéo-chrétiens, qui font le mal parce qu'ils ignorent la manière de faire le bien. Cependant, du point de vue mathématique, il n'y a pas de différence entre les meilleures manières de contrer les deux espèces de démons, et s'il est clair que les démons cybernétiques de la radio sont augustiniens, il y a peu de marge entre eux et les démons, manichéens, du radar. (Cf. nos « Jeux de communications », et la deuxième édition de Wiener : « On the Human Use of Human Beings ».)

La norme de Bayes

S'il ne doit plus être polyvalent, le récepteur n'aura pas à tabler sur le pire (ou le meilleur), et il s'efforcera de connaître des « habitudes » de l'émetteur. Le « cas classique » est celui où l'on connaît la probabilité *a priori* de chaque mot, c'est-à-dire sa probabilité de suivre l'ensemble des mots déjà identifiés. Le récepteur cherchera alors à minimiser la valeur probable du coût, soit $\overline{C}\ (R) = \Sigma\ C(R,E) \times$ (Probabilité de E).

Etant donné le rôle du théorème de Bayes, le programme qui minimise $\overline{C}$ est appelé *programme de Bayes*. Il existe des méthodes explicites pour le construire, dans le cas de certaines fonctions de coût suffisamment simples. On montre ainsi que le programme minimax est très souvent identique au programme de Bayes relatif à une distribution « la plus défavorable » des probabilités de mots, qui est fréquemment la distribution uniforme. (Diverses variantes du critère minimax mènent également à cette distribution, et s'efforcent en somme de systématiser et d'expliciter l'équi-répartition de la probabilité, que l'ingénieur postule souvent sans chercher de raisons.)

Donc, agir de la façon la plus « défavorable » pour le récepteur est encore une « habitude » de l'émetteur : les récepteurs de Bayes et minimax considèrent tous les deux que l'émetteur laisse au hasard le soin de déterminer son action. Ceci fait du message une fonction aléatoire, analogue au bruit, qui

a priori semblerait plutôt être son contraire. En particulier, ceci étend le domaine d'application de la physique aléatoire au domaine linguistique, jusqu'ici fort rétif à toute analyse rigoureuse.

Le choix de la stratégie de Bayes n'implique d'ailleurs pas l'hypothèse que, du point de vue de l'émetteur, le message soit indéterminé. Mais peut-on justifier positivement le choix d'une stratégie de Bayes particulière ? La situation n'est pas conceptuellement beaucoup plus facile qu'elle ne l'était dans le cas particulier du minimax : les solutions sont *raisonnables* parce que souvent les fréquences des mots sont à peu près stables et que, si la solution dépend beaucoup des fréquences adoptées, le coût de la solution en dépend peu. Pour le reste, c'est plutôt la théorie du comportement qui peut aider à comprendre ce que sont les probabilités, sous une forme « téléologique » et « subjective ». (Par exemple, de Finetti et Savage ont récemment développé un concept de probabilité à partir de la nécessité inéluctable de décider quel acte on choisira en présence d'une incertitude.)

En somme, l'introduction d'une conception aléatoire du signal par Kolmogoroff et Wiener a constitué vers 1940 un progrès absolument décisif en théorie des communications, mais ce progrès a lui-même très rapidement rendu nécessaire l'étude de ce qui se passe lorsqu'il n'existe pas de probabilité *a priori* des divers mots, étude parallèle au problème de l'estimation non de Bayes, mais qui n'est encore qu'à ses débuts.

L'information de Hartley-Shannon-Wiener

Si l'on ne peut construire effectivement la stratégie de Bayes, on peut essayer de lui comparer les stratégies constructibles. Ceci est possible dans le cas où chaque opération a deux résultats différents possibles, grâce au fait que le coût de Bayes peut être estimé approximativement sans qu'on ait à construire la stratégie correspondante.

Soit $H = \Sigma p_n \log^2 p_n$ où p_n sont les probabilités des mots. Si le diagnostic peut être fait par longues phrases, C peut être rendu aussi proche que l'on veut de H. H est l'information de Hartley, Shannon et Wiener, et on vient d'indiquer la seule manière légitime de l'introduire. L'information a les mêmes dimensions que le coût, et il faut tenir compte de chacun dans les bilans relatifs à l'autre. Si, de plus, on veut bien estimer la « valeur » d'un objet par son « prix » chez le marchand, le moins cher, — même s'il est inaccessible, — on pourra dire que l'information est le « gain » obtenu en communicant. C'est là une méthode de définition *a posteriori* de ce gain. M. P. Schutzenberger, après Shannon et d'autres, a également donné une deuxième méthode, qui fournit l'information, *a priori*, comme « temps intrinsèque » de la stratégie de diagnostic (et dont il a déjà parlé ailleurs, dans cette même revue).

Mais, encore une fois, bien d'autres concepts d'information s'introduisent dans la théorie de la décision, et pour ne pas arriver à des échanges absurdes entre divers concepts, il faut toujours tenir présent à l'esprit la décision de leur contexte.

Modèle de la structure de la langue

Comme exemple d'application de la cybernétique, nous signalerons, pour varier, un modèle permettant de décrire et d'« expliquer » des lois linguistiques empiriques, grâce à des concepts et outils créés pour traiter des problèmes normatifs de la communication.

Nous avons, dans d'autres travaux, démontré, discuté et développé en détail le résultat suivant :

Approximons la structure statistique d'un texte naturel (d'auteur unique, mais de langue quelconque) en le considérant comme suite de mots statistiquement indépendants, pourvus des fréquences réellement observées. Les mots sont pris sous forme fléchie ; on constate alors que *la loi de distribution de ces fréquences* — qui est un raffinement d'une loi d'Estoup et de Zipf — *est celle-là même qui, étant donné l'information par mot observée sur ce texte, aurait exigé le coût de décodage de Bayes par mot minimum* (par exemple le décodage le plus rapide en moyenne), *en admettant que chaque mot soit suivi d'un intervalle et que le décodage soit à part cela exhaustif et optimal.*

Sans pouvoir donner de détails, donnons les deux interprétations extrêmes de ce résultat.

Interprétation impersonnelle : le choix de la stratégie minimax pour un coût donné ou de Bayes pour des probabilités données consiste dans tous les cas à construire une nouvelle « physique anthropocentrique » du message. Nous constatons ici que l'une de ces physiques coïncide avec la physique « réelle », par suite elle constitue un « modèle cybernétique » de la réalité. Le procédé est le même que lorsqu'on constate que la trajectoire de moindre action de Hamilton ou de Lagrange se confond avec la trajectoire réelle, et qu'on utilise les principes de moindre action comme théories, et l'interprétation de notre modèle cybernétique variationnel peut être exactement la même que celle des modèles de la mécanique analytique. Il est cependant à présumer qu'en général un même résultat peut être donné par plusieurs modèles. C'est le cas ici : on peut introduire diverses variantes du modèle ci-dessus. On peut même supposer que *tout* résultat aurait pu être « expliqué » au moyen de quelque modèle cybernétique suffisamment compliqué et torturé. Les raisons d'accepter le présent modèle sont des raisons de simplicité et de compatibilité avec les explications d'autres phénomènes, tout comme dans le cas de modèles physiques mécaniques.

Interprétation subjective : toutefois, il n'y avait en mécanique analytique aucun agent ayant intérêt à minimiser l'action. Ici, au contraire, il *existe* un agent ayant intérêt à minimiser le coût. La structure de la langue peut donc être « intentionnelle ». Cette possibilité est d'un grand intérêt du point de vue de l'étude de certaines fonctions inaccessibles du cerveau, et du point de vue de l'étude d'un concept subjectif de la probabilité. Il est donc étonnant que les statisticiens aient si peu considéré jusqu'ici la mine d'exemples fournis par les langues pour l'étude du concept de la probabilité.

Le développement de la théorie de la statistique des textes, dont on a indiqué le résultat central, est caractérisé par des analogies extrêmement précises, et des différences essentielles, avec le développement de la thermodynamique selon Boltzmann. Il introduit des « variables d'état » d'un texte, et plus généralement un concept de structure aléatoire « macroscopique ». Il est intéressant qu'on en soit arrivé là (bien qu'il ne soit pas question de supposer que cette théorie acquière jamais l'importance de la thermodynamique), car il se trouve que dans plusieurs domaines, en même temps, la science s'oriente vers l'étude de telles structures macroscopiques (macroéconomie, grands ensembles de neurones, etc...). Ailleurs, on se borne à des structures microscopiques (petits groupes sociaux, algèbre des petits groupes de neurones, etc...). Les difficultés des problèmes intermédiaires, souvent les plus importants en pratique, restent partout entières.

Revenons à l'information, pour voir ce qu'apporte le succès d'un modèle basé sur ce concept. Il est tout à fait évident que les problèmes normatifs dont il est possible de tirer un modèle cybernétique acceptable, ont une signification particulière, intrinsèque, ainsi que les concepts qu'introduisent ces modèles. C'est l'analogue du rôle spécial des « actions » entrant dans des « principes de moindre action ».

On vient donc ainsi d'attribuer un rôle intrinsèque au minimum de coût dans la physique anthropocentrique de Bayes. Ce rôle intrinsèque peut paraître mineur, mais l'appareil introduit comme modèle de récepteur de Bayes se révèle aussi être identique au démon de Maxwell », ce qui permet d'éclaircir le sens d'un autre rôle intrinsèque de l'information, lié à l'analogie entre information et entropie. En effet, le message incident est un mélange d'éléments : les mots dans des états formes différents. Le récepteur qui « reconnaîtra » ces éléments se mettra donc dans une position où il pourra les « trier », ce qui était précisément le but dans la vie du démon de Maxwell, en présence de molécules de vitesses différentes.

Comment se présente dès lors le paradoxe du démon de Maxwell ? Il provient de ce que Maxwell négligeait de compter dans le même bilan l'entropie et le coût, donc du fait qu'il n'était

pas assez « ingénieur ». C'est Szilard (1929) qui a attiré l'attention sur cet oubli. Partant du concept d'entropie et du deuxième principe, considérés comme acquis, il a déduit une limite inférieure au coût des opérations d'identification du démon de Maxwell. Brillouin a continué ce travail, en estimant le coût directement à partir de quelques mécanismes spéciaux, et il a trouvé que le deuxième principe et la théorie des quanta sont compatibles. Quant au modèle de la réception de Shannon, que nous avons élaboré en un observateur de Bayes, on procède dans son étude de façon rigoureusement inverse de celle de Szilard. On se donne les coûts individuels ; l'information est une limite inférieure du coût moyen : on constate que ce gain anthropocentrique s'identifie à une propriété intrinsèque du message. Il aurait donc été légitime de supposer qu'il n'existe aucune stratégie « admissible » supérieures à celles qui ont été considérées : les modèles cybernétiques serviraient jusqu'en physique.

Conclusion

Nous espérons présenter ailleurs en détail tous les exemples dont la juxtaposition et l'organisation sont la raison d'être de ce que nous proposons d'appeler la cybernétique.

Ce qui précède est par nécessité très schématique, mais constitue une introduction à un ensemble d'idées déjà fort riche, ouvert vers des applications pratiques et des discussions philosophiques passionnantes. C'est là que réside l'intérêt de la cybernétiques, plus que dans quelques ménageries électriques ou mécaniques, quelque spectaculaires qu'elles soient.

B. Mandelbrot.

BIBLIOGRAPHIE

N. Wiener : Cybernetics, Hermann, éd., 1948.

N. Wiener : On the Human Use of Human Beings, Doubledon, 1954.

J. von Neumann and O. Morgenstern : Theory of Gaines, Princeton, 1943.

A. Wald : Statistical Decision Functions ; J. Wiley éd., 1950 ; ch. I.

L.-J. Savage : Foundations of Statistics ; J. Wiley éd., 1954.

B. Mandelbrot : Jeux de Communication, Institut de Statistique éd., 1953.

B. Mandelbrot : Structure formelle des textes, Word, 1954, 10-1-27.

B. Mandelbrot et M. P. Schutzenberger : Décision et Informations (en préparation).

B. Mandelbrot : Cybernétique (en préparation).

Braitawaite : Scientific Explanation, Cambridge, 1954.

J. Neyman : First Course in Probability and Statistics, H. Holt, 1950.

REMARQUES SUR LA STRUCTURE DE LA CONNAISSANCE PHYSIOLOGIQUE

par **A.-M. MONNIER**

Professeur à la Sorbonne

Je dois à la bienveillante sollicitude de M. Bouligand l'honneur de participer à ce cycle de conférences, où chacun vient parler librement de son métier. C'est un privilège assez rare et qui résulte de la qualité de l'auditoire. Celui-ci, en effet, est, avant tout, curieux d'apprendre les procédés et les modes de raisonnement qui sont propres aux diverses disciplines scientifiques. A ce sujet, il faut noter un fait remarquable : nul ne saurait librement discuter les règles de son métier devant les tenants de ce métier même. Dans une telle assemblée professionnelle, il serait considéré comme abusif de parler de règles implicitement admises de tous. En outre, mon discours y risquerait d'être taxé d'hérésie et, comme tel, repoussé sans examen et peut-être sans bienveillance.

Je vais donc ici avoir le plaisir de faire, sans détours, une sorte d'inventaire portant sur le but, les voies et les moyens propres à la Physiologie. Le bilan de cet inventaire aura ceci de particulier qu'il sera strictement personnel. Il aura un caractère essentiellement subjectif, dont je tiens dès l'abord, à m'excuser. Je suis persuadé, en effet, que d'autres physiologistes aboutiraient à des bilans tout différents. C'est donc une propriété de la Physiologie que de revêtir un aspect différent selon l'esprit de celui qui la pratique. Ceci dit, essayons de définir cette science. Ecartons toute définition basée sur l'étymologie pour la caractériser en un langage tout simple. La Physiologie se propose de connaître comment fonctionnent les êtres vivants. Le physiologiste a, en somme, le même souci que l'enfant, émerveillé devant un vélomoteur, et qui pose la question précise : comment ça marche ? Toutefois, l'enfant limite rapidement sa curiosité. Il se contente, par exemple, de saisir le comportement apparent du moteur. Très vite, il devient familier des tracas que lui infligent une bougie crasseuse ou un mélange mal dosé. Il prend ainsi pour simple ce qui lui devient familier. Quant à l'essentiel, à savoir l'équilibre de la bicyclette, cela lui paraît si naturel, si banal, qu'aucune question à ce sujet n'effleure son esprit. Ce n'est que beaucoup plus tard et comme résultat de ses études, qu'il aperçoit la justesse du propos de Langevin : « Ce qui est familier n'est pas forcément simple. » Il découvre que la thermodynamique des moteurs pose des problèmes non résolus et que la théorie des véhicules à deux roues a requis toute la sagacité de l'illustre mathématicien Boussinesq.

Le physiologiste, lui aussi, limite sa curiosité. Il sait qu'il sera heureux s'il réussit à élucider quelque détail du fonctionnement d'un seul organe. Il sait aussi que sa vie entière ne saurait que lui faire entrevoir l'infinie complexité des plus infimes éléments de l'organisme. D'où lui vient cette perception de la limite de ses ambitions ? Elle lui vient dès son début dans l'exercice du métier.

Comment pénètre-t-on dans ce métier ? On ne naît point physiologiste, comme on naît mathématicien. On apprend dès le baccalauréat que la Physiologie moderne est fondée sur les préceptes de Claude Bernard. Elle cherche à interpréter les mécanismes des êtres vivants à partir des lois physico-chimiques. Quelques-uns parmi les jeunes physiciens ou chimistes auront la chance d'être admis dans le laboratoire d'un physiologiste bienveillant et d'appliquer leur récente formation à l'étude d'un problème de physiologie. Ce fut mon privilège d'être accueilli comme jeune physicien dans le laboratoire de Louis Lapicque à la Sorbonne. Je fus tout d'abord absolument dérouté. Premier contact avec l'opération sur l'animal, la biochimie et l'immensité de la bibliographie, contact qui me laissa quelque peu ahuri. Toutefois Lapicque, par son enseignement et ses recherches, donnait alors une impulsion active et originale à l'Electrophysiologie. C'était un domaine qui ne m'était pas inaccessible. J'y découvris même un petit secteur où je pus utiliser mes rudiments de Physique et d'Electricité. Les résultats furent assez curieux, j'en dirai quelques mots plus loin. Mais ce faisant, je ne devins pas, pour autant, physiologiste. En fouillant un secteur étroit, je m'écartais de plus en plus de ce que j'aurais dû apprendre pour le devenir, c'est-à-dire, avant tout, la forme et le comportement des êtres vivants. C'est avec un grand effort que, sur le tard, j'ai dû reprendre cette étude nécessaire, et je dois avouer que je n'ai encore parcouru qu'une petite distance sur ce long chemin.

Au contraire, d'autres physiologistes furent tout d'abord des naturalistes, sagaces observateurs des formes vivantes. Par la suite, frappés de la disposition particulière d'un organe, et désireux d'en saisir le fonctionnement, ils se trouvèrent soudain devant un problème de physique ou de chimie. Pour tenter de le résoudre, ils se mirent courageusement à l'école de ces disciplines essentielles.

Autrement dit, je le répète, on ne naît point physiologiste. On le devient, et cela sur le tard, à un âge où ceux qui se sont consacrés aux sciences fondamentales s'y sont révélés des maîtres depuis de longues années.

La connaissance physiologique ne progresse que par l'usage de techniques délicates et de raisonnements subtils empruntés aux disciplines scientifiques les plus variées. La Physiologie est donc une science-carrefour où se rencontrent en somme toutes

les sciences. En toute rigueur, le physiologiste devrait donc les pratiquer toutes. Tâche impossible. Il s'en tire de deux manières : d'abord, grâce à une collaboration étroite avec les spécialistes. Il a la chance fréquente de voir ceux-ci lui prodiguer leur aide. Mais, très vite, il lui devient nécessaire de s'instruire de chaque méthode qu'il emploie. La nécessité de cet apprentissage varié, incessant, lui apparaît chaque jour plus impérieuse. Il arrive ainsi à une connaissance des méthodes scientifiques les plus diverses, superficielle évidemment, mais néanmoins très étendue. Le malheur est que l'approfondissement de cette connaissance multiple s'effectue à un âge où la faculté d'apprentissage décline.

Il faut souligner que la connaissance superficielle des disciplines les plus variées à laquelle parvient le physiologiste, lui donne néanmoins l'illusion d'une maîtrise de chacune de celles-ci. Le physiologiste a facilement l'illusion de l'omniscience, ou tout au moins, le sentiment d'une prise sur tous les aspects du monde réel. C'est je crois, cette illusion qui a maintes fois conduit des physiologistes illustres, souvent d'ailleurs avec quelque succès, vers des fonctions administratives ou gouvernementales. L'Histoire, même contemporaine, en fournit bien des exemples. Je n'en citerai qu'un seul, sans doute le plus ancien et le plus émouvant, celui de Paul Bert. Premier gouverneur de l'Indochine, il y mourut en moins d'un an, victime d'un climat dont la Médecine n'avait point encore réduit les effets, et épuisé par la tâche qu'il s'était promis d'accomplir.

Les connaissances inégales, mais variées, du physiologiste, entraînent néanmoins quelques conséquences heureuses. La diversité de son savoir conduit le physiologiste à se départir de tout esprit de système, elle l'incite à ne point hésiter à utiliser, tour à tour, les méthodes les plus opportunes, et à changer ses batteries le cas échéant.

Le physiologiste a quelquefois la chance de découvrir, au sein des être vivants, certains mécanismes physico-chimiques nouveaux et imprévus. En poussant l'étude de ces phénomènes inédits qui s'offrent ainsi à eux, les physiologistes ont parfois, en retour, apporté d'utiles renseignements aux physiciens et aux chimistes. J'en donnerai deux exemples.

C'est au botaniste Brown qu'est due la découverte du mouvement qui porte son nom, et qui s'est trouvé être caractéristique de l'état moléculaire de la matière.

Le biologiste contemporain Henri Devaux, le premier, imagina les méthodes physiques permettant l'étude des couches moléculaires superficielles, et mit en évidence le fait fondamental que les substances les plus diverses, en faible épaisseur, se comportent comme des fluides à deux dimensions auxquels les équations d'état des gaz peuvent s'appliquer avec fruit.

Ainsi, les connaissances du physiologiste, si elles sont le plus souvent extensives et superficielles, comportent quelques sondages parfois heureusement profonds.

Pour donner une image de la tâche dévolue au physiologiste, pour montrer la variété des connaissances qui lui sont nécessaires et pour souligner l'absence d'esprit de système qui doit caractériser ses raisonnements, je prendrai, et je m'en excuse, un exemple particulièrement concret. Envisageons certaines machines, créées par l'Homme, comme l'image infiniment simplifiée des êtres vivants. Nous puiserons dans cette comparaison un enseignement frappant.

Considérons les avions modernes. Ceux-ci sont parvenus à leur perfection actuelle, après innombrables essais et accidents. S'ils avaient été dotés d'organes reproducteurs, ils nous auraient donné, en raccourci, un schéma de l'évolution des êtres vivants. Seuls les avions qui n'auraient point connu trop d'accidents d'atterrissage auraient survécu et assuré leur descendance. En fait, l'Homme s'est substitué à eux pour assurer la perpétuation de leur espèce, en ne construisant que les appareils les moins fragiles. Mais la comparaison va plus loin. Prenons le cas des avions longs courriers les plus récents. Cherchons à décrire un tel avion de manière précise. C'est une tâche impossible. Pour une description exacte des divers organes de l'appareil, il faut le concours de nombreux spécialistes, bien distincts : celui des moteurs, celui des compresseurs, des carburateurs, de l'allumage, des commandes pneumatiques, des appareils de radio-communication, des appareils auxiliaires, etc., etc., et j'en passe beaucoup. Les spécialités elle-mêmes se fragmentent : par exemple, il y a des spécialistes pour chaque type d'instrument de navigation.

Ainsi, un avion, c'est-à-dire un être dont les premiers ancêtres vivaient, pourrait-on dire, il y a moins d'un demi-siècle, ne peut désormais être l'objet d'une description correcte fondée sur les connaissances d'un seul homme. Il faut noter aussi que cette difficulté se retrouve dans la création même d'un nouvel avion, considéré comme machine à voler. Chaque spécialiste s'efforce de le doter des meilleurs organes. Mais il faut ensuite intégrer le fonctionnement de ces divers organes dans un jeu d'ensemble : celui de l'avion en vol. Autrement dit, il faut faire en sorte que tous les organes de l'avion, non seulement fonctionnent sans se nuire, mais au contraire reçoivent bénéfices réciproques de leurs actions respectives. Cela exige d'innombrables essais et beaucoup de temps. Quinze ans en moyenne séparent l'avant-projet d'un avion long-courrier de sa mise en service sur les lignes transcontinentales. Ces quinze ans sont, à l'échelle humaine, l'image en raccourci de la longue durée de l'évolution des êtres vivants.

Je m'excuse à nouveau de cette comparaison, que beaucoup pourront considérer comme enfantine. Toutefois elle nous dé-

montre, par l'absurde, que le principe d'indétermination de Heisenberg se vérifie en ce qui concerne notre connaissance des êtres vivants. En effet la Physiologie dite générale, a été définie par Claude Bernard, comme l'étude des mécanismes *communs* aux être vivants. Qu'est-ce que cela donne à l'échelle des machines faites de main d'homme ? Cherchons donc les mécanismes communs à deux moyens de transport : l'avion et la locomotive. Cherchons, en somme, le mécanisme fondamental qui serait le commun dénominateur des deux engins. Nous arrivons à l'énoncé suivant très général mais simpliste : l'un et l'autre, l'avion et la locomotive, sont des machines à feu. Immédiatement, saute aux yeux tout ce que la généralité de cet énoncé supprime de connaissance réelle. Il est évident que l'avion et la locomotive sont totalement différents l'un de l'autre. Pour être exactement caractérisés, chacun requiert une description propre, c'est-à-dire exige une connaissance particulière qui exclut, dans son principe, l'idée de mécanismes généraux communs à ces deux machines. Autrement dit, la connaissance est d'autant moins précise qu'elle est plus générale. Nous avons donc là un véritable exemple d'un principe d'indétermination. Donnons maintenant un exemple de l'application de ce principe en Physiologie. Je choisirai évidemment cet exemple dans le domaine limité que je connais le mieux, c'est-à-dire celui où mon ignorance m'est le plus sensible.

Le système nerveux est l'appareil essentiel qui règle le jeu réciproque de tous les organes, l'appareil qui perçoit le monde extérieur par l'intermédiaire des récepteurs sensoriels et agit sur lui par l'effet des muscles. Il est un univers à lui seul, car il est formé comme tous les organes, d'innombrables unités distinctes ou cellules, qui ont chacune leur vie propre. Les centres nerveux, qui forment la substance grise, en comportent de nombreux milliards. A elle seule, l'écorce cérébrale contient plus de neuf milliards de cellules dites « neurones ». Chacun de ceux-ci est muni de fins prolongements qui permettent des contacts à distance, infiniment nombreux, avec les neurones d'autres centres. Certains de ces prolongements s'entourent d'une gaine isolante et s'en vont vers toutes les régions de l'organisme. Ce sont les fibres des faisceaux conducteurs, ou substance blanche des centres, et les fibres des nerfs périphériques.

Les liaisons entre les divers centres, telles qu'elles découlent de l'étude anatomique des faisceaux conducteurs, sont infiniment nombreuses et variées. Chaque centre reçoit des faisceaux provenant des autres centres. Il part de chaque centre des faisceaux à destination multiple. Il n'est pas exagéré de dire qu'il faut une vie aux neuro-anatomistes, pour acquérir une connaissance de la structure des divers centres et une connaissance pour ainsi dire géographique des liaisons multiples possibles entre eux après l'étude des faisceaux conducteurs. Bien des problèmes de cet ordre ne sont pas résolus, malgré les progrès des techniques

microscopiques où domine le nom de l'anatomiste espagnol Ramon y Cajal. Le microscope électronique est en train de renouveler nos connaissances sur la structure fine des neurones. Mais le cheminement de l'influx nerveux dans les centres n'est conditionné que pour une partie par les conducteurs révélés par l'anatomie. Dans la masse des neurones, l'influx chemine de l'un à l'autre, parcourant ainsi une chaîne de relais. Comment peut-on le saisir ? C'est là où intervient une propriété remarquable de l'influx : il se signale par une onde électrique, que l'on enregistre au moyen d'électrodes, d'amplificateurs et d'oscillographes appropriés.

L'étude directe des neurones est difficile en raison de la petitesse de ceux-ci. Elle n'a été possible que par comparaison avec le résultat de l'étude d'un matériel plus accessible : les fibres nerveuses elles-mêmes. Celles-ci sont d'ailleurs les prolongements des neurones, elles sont donc de la véritable matière neuronique. Ainsi des segments de nerfs peuvent être extraits du corps d'un animal et étudiés commodément en dehors de l'organisme. Pour cela, il faut assurer leur survie. Ceci ne s'obtient que si l'on suit scrupuleusement des règles fondées sur une longue expérience. Il faut donner aux nerfs isolés un environnement qui rappelle d'aussi près que possible celui auquel sont soumis tous les tissus de l'organisme. Il leur faut un milieu artificiel dont la composition est identique à celle de la partie liquide du sang. Ce milieu, notamment, doit contenir des ions alcalins et alcalino-terreux à doses bien précises. Le pH, la température, la teneur en oxygène et en gaz carbonique doivent être également bien déterminés. Ensuite il faut, dans ce segment de nerf, provoquer l'influx et enregistrer le signe électrique de ce phénomène. Or c'est l'excitation électrique qui éveille l'influx nerveux avec le minimum d'énergie et le minimum de dégâts. Le courant électrique apparaît donc comme l'excitant physiologique par excellence. Pour les nerfs moteurs, il suffit d'un courant de quelques micro-ampères, appliqué pendant moins d'un millième de seconde.

L'influx apparaît à l'oscillographe sous la forme d'une onde électrique brève qui, suivant le nerf envisagé, se propage à une vitesse allant du mètre à l'hectomètre par seconde. Cette onde résulte d'une dépolarisation de la fibre nerveuse. La fibre nerveuse est, en effet, à l'état de repos, électriquement polarisée. Sa surface extérieure est positive tandis que son milieu interne est négatif, ce qui donne une différence de potentiel permanente qui est de l'ordre de 60 à 80 millivolts. Chaque point occupé par l'influx nerveux correspond à une dépolarisation superficielle de la fibre, qui se propage par suite du courant local qu'elle provoque. En effet, ce courant va dépolariser les régions adjacentes encore au repos, assurant ainsi le renouvellement et le cheminement, de proche en proche, de l'influx nerveux. Donc, l'influx nerveux se comporte comme un excitant électrique. Sa

forme particulière d'une part, et l'allure en fonction du temps du phénomène d'excitation qu'il engendre d'autre part, permet d'appliquer à ces deux termes une généralisation amusante que j'ai proposée il y a bientôt vingt-cinq ans. L'influx incident parvenant à un neurone, se comporte comme une onde apériodique très amortie appliquée à un système également très amorti. L'échange d'énergie qui en résulte peut être exactement exprimé par les lois qui régissent un tel échange dans un cas très particulier : celui des circuits couplés dotés d'un amortissement très fort. C'est un cas particulier justement négligé par les spécialistes de la radioélectricité, lesquels s'efforcent toujours de réduire l'amortissement de leurs circuits. Cependant, il m'a suffi de transposer, dans les équations classiques des circuits couplés, les lignes trigonométriques circulaires en leur équivalent hyperbolique. J'ai obtenu ainsi une image remarquable de l'excitation interneuronique, conforme d'ailleurs à la théorie de Lapicque, qui basait alors l'activation réciproque sur l'accord de leurs constantes de temps ou « chronaxies » respectives.

Cette transposition m'a donné, à l'époque, une certaine habileté dans le maniement de la trigonométrie hyperbolique. Elle ne m'a pas, pour autant, rendu mathématicien accompli. Mais elle m'a conduit à ne pas être surpris quand des faits nouveaux sont apparus et ont nécessité une interprétation plus large. On savait, depuis longtemps, que la baisse du calcium sanguin provoque la tétanie généralisée des muscles, c'est-à-dire une activité spontanée des éléments nerveux moteurs. Un nerf isolé placé dans un milieu salin pauvre en calcium manifeste une tendance à l'activité spontanée, c'est-à-dire une tendance à l'émission automatique d'influx rythmés. Mais, dans ces conditions, ce nerf présente des particularités nouvelles, très remarquables. Soumis à un courant alternatif, il est excité avec une intensité d'autant moindre que la fréquence du courant s'approche d'une valeur bien déterminée. Il montre ainsi une « résonance » tout à fait caractéristique. On observe, en outre, que dans ce nerf le phénomène d'excitation, éveillé par un stimulus bref, suit une loi sinusoïdale peu amortie. Nous sommes donc ramenés, dans ce cas, aux lois générales de la radioélectricité, avec toutefois cette réserve que les fréquences observées sont basses : de l'ordre de quelques centaines de cycles par seconde.

La fibre nerveuse peut donc être caractérisée par un certain degré d'« amortissement », lequel peut varier dans de larges limites selon les conditions expérimentales. A l'état normal, le nerf est fortement amorti. Autrement dit, ses processus d'excitation ont une allure apériodique, et aucune tendance à l'activité spontanée ne s'y manifeste. Dès que l'amortissement s'abaisse, par exemple du fait de la décalcification, le caractère périodique des processus d'excitation se dessine. Lorsque l'amortissement est suffisamment faible et, de ce fait, la pério-

dicité des processus d'excitation, nettement accusée, des influx rythmés s'amorcent spontanément dans chaque fibre nerveuse.

En général, *in vivo*, les nerfs sont fortement amortis, mais les nerfs sensitifs le sont bien plus que les nerfs moteurs, comme l'a montré Laget dans mon laboratoire. Ce dernier a vu en outre que les nerfs des mammifères ont une tendance naturelle à avoir un faible amortissement, c'est-à-dire une tendance à se comporter comme des systèmes doués de périodicité, capables d'être l'objet de réponses rythmiques régulièrement entretenues. Dans l'organisme, ces nerfs sont maintenus au silence par l'action du gaz carbonique dissous dans le sang. En effet, non seulement ce gaz accroît la polarisation électrique des fibres nerveuses, comme l'a montré Lorente de No, mais en outre il augmente l'amortissement, se montrant même l'amortisseur physiologique par excellence.

Comment s'exerce cette fonction amortissante de l'anhydride carbonique ? Est-ce du fait de la réaction acide que ce gaz communique au milieu ? Corabœuf a entrepris cette étude dans mon laboratoire, il a montré qu'il s'agissait d'une action particulière, spécifique, du gaz carbonique. Ce gaz, produit normal de la respiration, c'est-à-dire résultat de la dépense des réserves énergétiques, est produit par des réactions métaboliques assez bien connues. Mon collaborateur Legouix a montré que ces réactions peuvent être considérées comme réversibles. L'anhydride carbonique dissous dans le sang limite les réactions métaboliques des éléments nerveux et freine ainsi l'activité de ces éléments. On s'explique ainsi le rôle amortisseur de ce gaz.

On ne peut donc dissocier l'activité des éléments nerveux, de l'étude des mécanismes métaboliques proprement dits. Or, l'ensemble des réactions métaboliques générales de la cellule est d'une infinie complexité. Mais les fibres nerveuses ont ceci de particulier que leur fonctionnement ne met en jeu qu'une énergie infime, c'est-à-dire un métabolisme des plus petits. A titre d'exemple, une fibre nerveuse transmettant 100 influx par seconde consomme 1 millionnième de millimètre cube d'oxygène par centimètre de longueur et par heure. C'est dire que l'étude de la fibre nerveuse est vraiment du domaine de la microphysiologie. Heureusement, comme toujours, une autre discipline est venue au secours du physiologiste. L'anatomie comparée a indiqué le matériel destiné à révolutionner nos moyens d'étude. Le naturaliste anglais Young avait remarqué que les céphalopodes, tels que la seiche, présentent une fibre, celle du manteau, qui est d'un calibre extraordinaire : 1 millimètre, alors que les fibres nerveuses des mammifères n'excèdent pas 20 microns de diamètre. On a donc pu, sur cette fibre géante, faire commodément de la microphysiologie. L'utilisation de microélectrodes, fines pipettes de verre que l'on a réussi à insérer dans l'axe même de la fibre, a permis une analyse exacte des phénomènes électriques associés à l'influx nerveux. Hodgkin et ses collabo-

rateurs ont pu aller encore plus loin à l'aide de ce matériel. Ils ont montré que l'influx nerveux résulte de l'échange d'ions entre l'intérieur et l'extérieur de la fibre ; lors de l'influx, des ions sodium pénètrent dans la fibre, alors que du potassium en sort. Cet échange est d'ailleurs infime. Il est de l'ordre de 10^{-12} ion-gramme par centimètre carré de la surface de la fibre. Comment se fait le retour à l'équilbire ? Il faut envisager des mécanismes transporteurs particuliers, des sortes de « pompes » ioniques mues par le métabolisme, et dont le fonctionnement est encore particulièrement obscur.

Un fait s'impose d'ailleurs avec une netteté frappante au fur et à mesure que se perfectionnent les micro-techniques d'investigation : c'est le nombre de mécanismes distincts dont le jeu simultané forme la fonction du nerf. Par exemple, la méthode polarographique appliquée par Brink et Bronk, à l'étude du métabolisme du nerf, permet de saisir, dans ses plus fins détails, l'absorption de l'infime volume d'oxygène requis par l'influx nerveux. La micro-spectrophotométrie ultra-violette, réalisée par A. de Muralt, enregistre, sur une fibre nerveuse unique, pendant la brève durée de l'influx, de fugaces variations du spectre d'absorption, d'où il sera peut-être possible de déduire les corps chimiques mis en jeu ainsi que la nature des réactions ultra-rapides auxquels ils participent. Enfin, le microscope électronique révèle maints aspects jusqu'alors insoupçonnés et qui conduisent à un renouvellement total de nos idées sur la structure des éléments nerveux. En particulier, cet instrument, entre les mains de Gasser, montre que les nerfs des mammifères contiennent un nombre fantastique de fibres restées inaperçues jusqu'ici en raison de leur infime diamètre, de l'ordre du dixième de micron.

Ainsi, à l'échelle du nerf isolé, le nombre des problèmes qui se posent au physiologiste est immense et requiert de lui l'absence de tout esprit de système et l'usage de techniques infiniment diverses.

Que dire lorsque l'on passe à l'ensemble du système nerveux ? Nous avons, par exemple, à considérer l'activation des muscles par les nerfs moteurs. On sait actuellement qu'à la jonction neuro-musculaire, existe une sorte de relais biochimique de l'influx nerveux. Celui-ci provoque en ce point l'apparition d'une substance chimiquement définie : l'acétylcholine, ou l'adrénaline, éminemment propre à déclencher la contraction musculaire.

La génèse et le mode d'action de ces substances dites médiatrices, posent certains problèmes qui sont parmi les plus délicats de la biochimie moderne. Il est possible que les théories chimiques récentes, fondées sur la mécanique ondulatoire, permettent de rendre compte des effets des médiateurs, de la même manière qu'elles interprètent l'action cancérigène de certains corps.

Parmi beaucoup d'autres questions primordiales, il y a celle de l'acheminement de l'influx dans les centres, par les voies que l'anatomie ne permet pas de mettre en évidence. C'est le problème de l'activation des chaînes de neurones. L'expérience a récemment donné quelques lumières sur ce problème. Eccles a réussi à introduire une micro-électrode au sein d'un neurone unique et il a pu ainsi suivre les modalités de son activation sous l'effet de la mise en jeu des neurones adjacents.

La physiologie individuelle des neurones des diverses parties de l'écorce cérébrale peut être désormais étudiée. Déjà, en quelques années, les résultats d'un intérêt extrême s'accumulent. A titre d'exemple, Tunturi a réussi à montrer la répartition des neurones de l'aire acoustique en fonction de la hauteur des sons perçus. Ces neurones sont distribués à la façon d'une harpe, occupant des lignes également espacées, d'octave en octave, suivant les fréquences sonores qu'ils perçoivent.

Les neurones doués d'une sensibilité spéciale, tels que les neurones photo-sensibles de la rétine, ont pu être, de même, étudiés un à un. Granit est parvenu à distinguer les divers types de récepteurs rétiniens, selon les longueurs d'ondes des radiations auxquelles elles sont plus particulièrement sensibles. Par ces recherches, les bases de la vision des couleurs tendent à être solidement établies. D'autre part, l'excitation des récepteurs rétiniens par la lumière suscite actuellement maintes études photo-chimiques. Celles-ci, entre les mains de Morton et surtout de Wald, ont abouti à la découverte du cycle photo-chimique des bâtonnets de la rétine, cycle dont le fonctionnement convenable requiert la présence de la vitamine A.

Toutefois, la physiologie des neurones est surtout, jusqu'ici, une étude statistique de leurs activités, L'électro-encéphalogramme révèle, en effet, que de larges aires de l'écorce cérébrale sont le siège de fluctuations électriques régulières, ce qui montre que de vastes populations de neurones présentent une activité d'ensemble synchrone. Autrement dit, l'étude microphysiologique d'un neurone unique, certainement riche d'enseignements, a, peut-être, l'inconvénient d'isoler artificiellement le neurone de toute la population neuronique dont il fait partie. Tout semble, en effet, indiquer que de grands ensembles de neurones fonctionnent « en masse ». Cette conception a abouti à la notion de « réseaux » neuroniques et a ouvert la voie à d'intéressantes spéculations. Certains auteurs ont ainsi admis que la mémoire est fondée sur des chaînes de neurones, fermées sur elles-mêmes, et en activité perpétuelle, du fait de la circulation permanente d'influx. La mémoire est certainement basée sur des mécanismes plus complexes et plus subtils. Mais ce genre de spéculations est loin d'être inutile. Il conduit notamment, en ce cas, à d'intéressantes applications de la théorie mathématique de l'information.

Cet exposé suffit, je pense, à montrer que la mise en évidence de mécanismes généraux communs à tous les éléments du système nerveux ne saurait conduire à la connaissance du fonctionnement de ce système. Celle-ci est fondée, non pas sur ce qui paraît général, mais sur le détail. En effet, l'expérience nous révèle au sein du système nerveux et dans le moindre neurone, le jeu d'innombrables mécanismes. Ceux-ci, étroitement imbriqués les uns dans les autres, sont capables de se prêter appui mutuel, assurant ainsi, lors de défaillances éventuelles, la pérennité de la fonction. Il nous reste donc à étudier ces mécanismes, sans esprit de système, mais selon les moyens les mieux appropriés. « Si le latin n'y va pas », comme disait Montaigne, « que le patois y aille ».

Les physiologistes du début de notre siècle croyaient fermement que la vie était fondée sur quelques grands mécanismes communs à tous les organes de tous les êtres. Ils nourrissaient l'espoir de leur découverte prochaine. Aujourd'hui, cette croyance en une simplicité idéale apparaît illusoire, l'espérance qu'elle créait est morte.

Au contraire, la connaissance physiologique apparaît essentiellement soumise au principe d'indétermination. Elle est d'autant moins précise qu'elle se veut plus générale. C'est par la mise en lumière détail qu'elle progresse. Mais, du même coup, elle rencontre une limite, d'ailleurs indéfiniment reculée. Quelle est cette limite ? C'est un effet de nombre. Les mécanismes physiques et biochimiques et leurs liens réciproques, que nous distinguons dans la plus minime cellule, sont déjà en nombre écrasant, et nous en laissent entrevoir d'autres en nombre immense. Chacun de ces mécanismes, pris isolément, est probablement d'essence compréhensible. Mais, ce qui ne le sera jamais totalement, c'est le jeu simultané de leurs liaisons et de leurs réactions réciproques et innombrables.

La connaissance physiologique, si elle est de cette manière limitée dans son accomplissement ultime, est aussi, et cela est plus grave, limitée dans son progrès quotidien par un processus de nature identique. Il se perd chaque jour une quantité importante de connaissances physiologiques, pour une raison bien simple : le grand nombre des chercheurs et le grand nombre des publications. Plusieurs centaines de périodiques traitent de problèmes physiologiques. Les références bibliographiques se chiffrent à plusieurs dizaines de milliers par an.

Une pareille pléthore découle en partie d'une obligation fâcheuse, mais inéluctable, imposée aux chercheurs, en tous pays. En effet, leur carrière dépend malheureusement du nombre de leurs publications, ce qui alourdit abusivement la bibliographie.

D'autre part, bien des résultats ne peuvent, par leur nature même, jeter la moindre lumière sur le fonctionnement normal

des tissus vivants. Ce sont, en effet, les résultats qui découlent de ces expériences dispersées et sans suite qu'entreprennent volontiers bien des chercheurs. Par exemple, on étudie une série de drogues nouvelles, et on constate qu'elles augmentent toutes la pression artérielle ou le métabolisme cellulaire. On en déduit hâtivement qu'elles agissent toutes de la même manière. Or, la pression artérielle ou la respiration des cellules, reposant sur des mécanismes infiniment nombreux, l'effet d'une drogue peut évidemment avoir le même résultat final, tout en jouant sur un mécanisme totalement différent. C'est évidemment ce mécanisme qu'il importe de connaître afin de savoir comment le résultat final est obtenu. Autrement dit, de nombreuses expériences décrites par la littérature physiologiste ressemblent par trop à un exercice fantaisiste et caricatural, comme celui qui consisterait à noter l'effet produit sur un moteur d'automobile par des agents aussi divers qu'un jet d'eau, de l'émeri dans l'huile ou du sucre dans l'essence, puis à conclure à l'identité de leur action. Tous arrêtent évidemment le moteur, mais par des voies bien différentes.

Malgré tout, les articles publiés, porteurs d'utiles renseignements, sont en nombre immense. Or, ces renseignements se perdent malgré toutes les précautions. L'exemple le plus remarquable est celui des antibiotiques secrétés par les moisissures, que Pasteur avait entrevus et qu'un biologiste français avait décrits il y a plus de quarante ans. Il a fallu un hasard heureux, servi par l'intuition géniale de Fleming, pour que ce phénomène fût retrouvé et donnât lieu à la bienfaisante application que l'on sait. Toutes les documentations, toutes les techniques de classement, ne peuvent éviter cette perte de connaissances. La mécanographie la plus perfectionnée ne peut l'empêcher. Pour enregistrer sur une carte, au moyen d'une perforation symbolique, un renseignement donné au moment de sa publication, en vue d'une publication ultérieure éventuelle, encore parfaitement indéterminée, une condition essentielle doit évidemment être remplie. Ce renseignement, parmi la masse de ceux publiés doit avoir été *repéré* et ensuite retenu en vertu d'une signification, qu'à tort ou à raison, le chercheur lui attribue. Il est certain que cette sélection préalable en vue de l'avenir ne s'accomplit que rarement.

Le bilan annuel de la connaissance physiologique est cependant nettement favorable. Mais, dans ce but, le physiologiste doit s'imposer l'effort d'une érudition perpétuellement renouvelée. Il lui en reste toujours le meilleur, c'est-à-dire tout ce que sa sagacité, au jour le jour, aura confié à sa mémoire, pour être ultérieurement, à chaque instant, à la disposition de son esprit. Ce choix judicieux est la raison d'être du chercheur. Aucun engin mécanographique, quelle que soit sa perfection, ne saurait l'exercer à sa place.

(*Voir suite page* 315.)

Importance paléogéographique des mouvements de subsidence du Pacifique Central

par Raymond FURON

Les figures paléogéographiques destinées à faciliter l'exposition de l'histoire d'un continent ou d'un océan ne peuvent être dessinées que d'après des documents géologiques. En l'absence de tels renseignements, des hypothèses s'échafaudent selon les besoins de la biogéographie. De toute façon, les figures sont nécessairement fausses et ne visent qu'à exprimer graphiquement des possibilités ; elles ne doivent pas être utilisées directement par les biologistes, sans les compléter des renseignements paléoclimatiques. Ceux-ci sont d'autant plus importants qu'ils permettent de comprendre le peuplement des continents à partir d'une Arctide ancienne tempérée. Le passage entre l'Amérique du Nord et l'Asie se faisait tout naturellement par la région de Behring souvent émergée et de climat tempéré.

La Paléogéographie du Pacifique offre des difficultés particulières. On trouve deux tendances contradictoires dès les débuts de la Géologie : depuis Huxley en 1870 jusqu'à Haug (1911) et leurs « supporters », l'Océan Pacifique est de formation récente, puisque son emplacement était occupé par un vaste continent entouré de géosynclinaux ; tandis que depuis Dana (1846), l'autre école soutient la permanence relative de cet Océan. Parmi les derniers auteurs ayant tenté de reconstituer l'histoire du Pacifique, nous rappellerons les noms de Gregory (en 1930) et de L. Joleaud (en 1934 et 1940). On ne peut que louer ces tentatives qui constituent des mises au point et provoquent d'utiles discussions.

Notre propos sera plus modeste. Constatant combien les biogéographes manquent de documentation géologique, il nous a paru utile de regrouper les notions acquises au cours de ces dernières années, notions qui éclairent fort bien l'histoire du Pacifique depuis le Crétacé.

Les données de la Séismologie

Les publications de MM. B. Gutenberg et C.-F. Richter ont apporté des données très nouvelles sur la répartition précise des séismes autour du Pacifique, en particulier sur la localisation des foyers.

En avant des guirlandes du Pacifique occidental (Kouriles, Japon, Iles Bonin), on connaît l'existence de fosses profondes.

Les foyers superficiels sont situés au bord externe de la fosse, les foyers de profondeur moyenne sont sous les îles, dans la zone volcanique ; les foyers profonds se situent en position plus interne.

La même disposition se retrouve sur la côté pacifique de l'Amérique du Sud, bordée elle aussi par une fosse profonde ; les foyers y sont de plus en plus profonds de la côte vers l'intérieur.

Par contre, la côte de Californie, qui n'est pas bordée par une fosse, connaît un régime différent. Les séismes y semblent directement liés au jeu de failles bien connues comme celle de San Andreas, à San Francisco.

Dans le Pacifique central, il ne semble y avoir de tremblements de terre qu'aux Iles Hawaï.

Dans l'ensemble, le Pacifique est donc limité par une ceinture de volcans et de tremblements de terre.

Quelle est la nature du fond du Pacifique ? *Sial* ou *Sima* ? Les hypothèses les plus solides étaient basées sur l'étude des vitesses de propagation des ondes séismiques. Or, ces études sont très fragiles et M. G. Gutenberg écrit en 1951 que « les nouveaux résultats montrent clairement que notre connaissance de la croûte terrestre est bien moindre qu'on ne le croyait dix ans plus tôt »...

On suppose que la zone des magmas ultra-basiques se trouve à environ dix kilomètres de profondeur et qu'elle est recouverte par des roches sédimentaires contenant des intercalations volcaniques. Il y aurait une coupure brutale entre la zone océanique et la zone continentale, au contraire de ce qui se passe dans les autres océans, qui se relient au continent par une zone de transition.

Les données de la Pétrographie

On a longtemps cru (sans raison valable) que les laves du Pacifique étaient différentes de celles de l'Atlantique et on a pu opposer un « faciès pacifique » calco-alcalin à un « faciès atlantique » alcalin. En 1923, M. P. Niggli admettait encore la réalité de ces deux provinces, subdivisant d'ailleurs la province atlantique en « atlantique » vraie plus sodique et « méditerranéenne » plus potassique.

Dès 1902 toutefois, Alfred Lacroix avait décrit une monzonite néphélinique de Tahiti (*in* Matériaux pour la Minéralogie de Madagascar. *Nlles Archives du Muséum*, Paris, 1902, t. 4, pp. 133-134). En 1910, le même auteur, en possession d'analyses plus complètes, montrait l'existence d'une « série atlantique » au cœur du Pacifique, puis M. P. Marshall signalait les syénites néphéliniques des Iles de Cook. Les analyses se multiplient, R. Daly et H.-S. Washington exposent en 1921 les connaissances d'ensemble, encore bien insuffisantes. En 1926, le III[e] Congrès

PanPacifique profite d'un exposé d'Alfred Lacroix (publié en 1927 dans les Mémoires de l'Académie des Sciences) et met la question à l'ordre du jour de la session de 1929.

Il apparaît dans l'ensemble une distinction fondamentale :

— les zones bordières sont caractérisées par la présence d'andésites ;

— les îles « océaniques » volcaniques sont essentiellement basaltiques, avec des laves déficitaires en silice ; on ne leur connaît pas de socle ancien granitique ou métamorphique.

Ceci permet d'isoler tout de suite les îles occidentales constituant la Mélanésie (Bismarck, Salomon, Nouvelles-Hébrides, Fiji), îles dont on connaît le socle ancien, tantôt en surface, tantôt sous forme de blocs remontés par les volcans. Il s'agit là d'un ancien domaine continental, où l'on connaît également des andésites, et qui fut en relations avec le domaine australien et indo-malais. Son étude est à faire avec celle de la Nouvelle-Calédonie et sort du domaine de cette note.

Un domaine continental de même type se retrouve plus au sud, dans le groupe lié à la Nouvelle-Zélande, depuis Kermadec.

Dans le Pacifique sud-oriental, les Iles Galapagos sont bien de type océanique pur, mais l'Ile de Pâques possède des basaltes andésitiques, des tufs andésitiques et des obsidiennes rhyolithiques. Pitcairn a donné des trachytes et des andésites.

La question peut donc valablement se poser de savoir si ce groupe ne constitue pas lui aussi le souvenir d'une grande terre, dont on ne connaît pas le socle. Par ailleurs, les données séismologiques indiquent en profondeur des « réflexions » continentales dans la zone 20-25°S et 85-90°W ; tout ce qui est au NNE des Galapagos est au contraire de type « pacifique ».

Dans le Pacifique central nord, l'archipel des Hawaï a été très étudié, en particulier par H.-S. Washington et R.-A. Daly. On trouve là une grande variété de roches volcaniques : basaltes labradoriques avec ou sans olivine, océanites, andésites et trachytes. Le tout provient d'un magma basaltique et les variations observées sont du même ordre que celles qui sont connues sur les volcans continentaux.

Les problèmes de la pétrogenèse profonde restent entiers. Par contre l'évolution des appareils volcaniques apporte des renseignements géologiques.

Les données de la morphologie sous-marine
Guyots et subsidence

Les auteurs américains ont signalé de nombreux plateaux sous-marins dans tout le Pacifique : ce sont les « guyots », dont la plateforme se situe souvent vers 1.200-1.500 mètres de profondeur. Ils sont généralement considérés comme des éléments de reliefs sub-aériens (continentaux ou de la zone située

dans celle du balancement des marées). Leur profondeur ordinaire est comparable à celle des canyons sous-marins.

Ceci impliquerait une subsidence de l'ordre de 1.000 et 1.500 mètres.

Un guyot du Pacifique central, dont le sommet est à 2.000 mètres de profondeur, a livré à la drague des coraux d'âge Crétacé (E.-L. Hamilton, 1951).

Dans le golfe de l'Alaska, il existe de nombreux reliefs sous-marins : des îles volcaniques restées coniques et des guyots. On sait que la zone sud de l'Alaska (péninsule de Kenaï et île de Kodiak) fut une zone de sédimentation et de subsidence pendant le Trias (600 m.), le Jurassique (6.000 m.) et le Crétacé (2.000 m., avec dépôts volcaniques dans les Aléoutiennes). Un plissement de la fin du Crétacé a repoussé la zone géosynclinale vers le sud. On connaît les dépôts continentaux à charbon de l'Eocène du nord de Kenaï, tandis que la zone sud ainsi que le sud de Kodiak restaient sous l'eau pendant le Tertiaire. La fosse des Aléoutiennes est située en avant ; elle a reçu des épaisseurs considérables de sédiments, si l'on en juge d'après la zone émergée à l'est (8.000 mètres de dépôts tertiaires). De plus, les sédiments pliocènes et quaternaires (600 mètres d'épaisseur) ont été soulevés à plus de 1.500 mètres dans la zone côtière au sud du Mont-Elias (ainsi que tout au long de la côte américaine).

Certains guyots peu profonds seraient les témoins du mouvement de subsidence post-pliocène (Ménard et Dietz, 1951).

Les données des grands forages et la subsidence

Dès 1881, Ch. Darwin avait écrit à Alexandre Agassiz qu'il souhaitait voir quelque riche mécène faire exécuter un forage de 5 à 600 pieds dans un atoll, afin de démontrer que la croissance des coraux y était continue sur un fond en légère subsidence. La Société Royale de Londres répondit à ce vœu quinze ans plus tard, en 1896, en envoyant l'expédition de Funafuti. De son côté, en 1897, Agassiz commença un forage sur l'atoll de Wailangilala, aux Fiji, mais il s'arrêta à environ 30 mètres, lorsqu'il apprit que l'expédition de Funafuti avait atteint les 600 pieds souhaités par Darwin. Elle atteignit même 340 mètres, ayant traversé uniquement des calcaires coralliens à faune récente (Hinde, 1904).

Le forage de Bikini (Marshall) a traversé des formations coralliennes quaternaires depuis la surface jusqu'à 240 mètres de profondeur, puis pliocènes de 240 à 380 mètres, enfin miocènes de 380 à 852 mètres (Ladd, Tracy et Lill, 1948).

Sur la bordure occidentale du Pacifique, le forage de Kita-Daito-Zima (au sud de l'archipel japonais) a traversé le Pliocène (jusqu'à 103 mètres), le Miocène (jusqu'à 295 m.), et

l'Oligocène, de 295 à 432 mètres (Hanzawa, 1940). Les derniers sondages sont ceux de l'atoll d'Eniwetok, dans les Iles Marshall (Ladd, Ingerson, Townsend, Russel, Stephenson, 1953).

Un forage a touché le basalte (?) à 1.540 mètres. La coupe est fort instructive : calcaires, coraux et foraminifères plio-pléistocènes jusqu'à 200 mètres ; Miocène à Lépidocyclines et Miogypsines jusqu'à 333 mètres ; puis *Miogypsinoides Dehaartii* du Tertiaire *e, Spiroclypeus margaritatus* et Hétérostégines jusqu'à 933 mètres ; Eocène à Astérocyclines jusqu'au bed-rock.

Les résultats ont été les mêmes dans le second forage qui a remonté du basalte de 1.407 mètres. On ne peut savoir s'il s'agit d'un volcan ou bien d'une coulée. De toute façon, le volcan peut être daté du Crétacé supérieur et il était éteint lors d'une transgression éocène.

Il est à rappeler à ce propos que des fragments de basalte ont été dragués sur les pentes sud-est de Bikini, au-dessous de 2.000 mètres et au-dessous de 1.500 sur le guyot Ouest.

Ceci nous fait encore penser à l'activité volcanique extraordinaire de la fin du Crétacé, dans le monde entier.

L'ensemble de l'étude des sondages et des dragages sur guyots montre une subsidence de 2.000 mètres dans le Pacifique central depuis la fin du Crétacé et encore de plus de 800 mètres depuis le début du Miocène.

Les données de la Géologie

Les observations géologiques ordinaires (celles de surface) nous ont appris l'existence de formations marines sur les lieux où se trouvent actuellement des îles.

Les dépôts les plus anciens seraient ceux du Nummulitique des Iles Marshall (Jaluit), des Gilbert et de Cook, des Tonga (à Orthophragmines).

L'Aquitanien (à Lépidocyclines et Miogypsines) est connu en Mélanésie et aux Tonga, aux Marshall (Jaluit) et dans les îles de Cook.

Le Miocène supérieur mal défini et le Pliocène (toujours corallien) sont cités en divers points, en particulier aux Nouvelles-Hébrides.

On observe ainsi un mouvement de surrection (contraire aux subsidences indiquées précédemment).

H.-T. Stearns, à qui l'on doit de remarquables études, cite par exemple aux Iles Wallis trois terrasses coralliennes soulevées, à 2 mètres, à 8 mètres et à 25-30 mètres. Il semble bien y avoir un niveau supérieur vers 80 mètres, indiqué par de gros galets de basaltes.

Aux Nouvelles-Hébrides, E. Aubert de La Rüe indique des récifs coralliens soulevés à 350 et 400 mètres dans l'île d'Efate.

Il y a donc de véritables plissements compliqués de fractures sur lesquelles sont alignés les volcans récents.

Les successions de formations coralliennes et volcaniques ont permis à P. Marshall aux Iles Cook et à H.-T. Stearns aux Samoa (1944) de reconstituer l'histoire de certains archipels du Pacifique central.

C'est au Crétacé supérieur que remonterait la première émersion connue, suivie de l'installation des premiers volcans. Dès l'Eocène inférieur, les récifs s'organisent et le mouvement de subsidence commence.

Une nouvelle émersion se manifeste au Miocène supérieur et les volcans pliocènes épanchent leurs basaltes. Nouvelle submersion partielle au Pléistocène inférieur et extension des coraux. Au Pléistocène moyen, un nouvel épisode volcanique commence et les coraux sont noyés sous les basaltes. Lors d'une dernière submersion du Pléistocène supérieur (de l'ordre de 7 mètres) de nouveaux coraux pourront s'installer sur la plateforme d'abrasion. Les derniers basaltes s'épanchent dans les vallées et l'île s'entoure de récifs frangeants.

Les auteurs sont frappés par l'importance des récifs fossiles et la rareté relative des coraux vivants. Aux Iles Wallis. H.-T. Stearns indique à Uéa l'existence d'un récif frangeant visible à marée basse et accessible en « jeep », mais les coraux vivants, écrit l'auteur, en sont pratiquement absents. En bien des points, le « récif frangeant » est une plateforme d'abrasion à même le basalte, sans même de calcaire. Plus au large, se trouvent des récifs-barrière, plantés sur une plateforme située à 60 mètres de profondeur. Le récif-barrière d'Uéa est la relique d'un récif bien plus important qui était implanté sur la plateforme de 60 mètres au Pléistocène et dont une partie est déjà détruite par l'érosion depuis l'élévation du niveau de la mer due au dernier épisode interglaciaire.

Aux Iles Loyauté, F.-R. Haeberle (1952) a visité les trois grandes îles (Uvéa, Lifu et Maré), à 60 milles au nord-est de la Nouvelle-Calédonie. Uvéa est un atoll en voie de croissance. Lifu est un atoll mort atteignant 60 mètres de hauteur. Maré est aussi un atoll mort, sur serpentine visible, atteignant 100 m. d'altitude : il n'y a plus que de rares coraux vivants.

Quant aux récifs coralliens de l'Astrolabe et autres îlots situés un peu plus loin au nord-ouest, ils sont tous formés de coraux morts.

Les observations des géologues rejoignent ici celles des biologistes (Ranson, 1953-55).

L'étude des données paléoclimatiques montre l'existence d'un climat tempéré dans les régions arctiques, permettant des échanges de faune et de flore entre l'Asie nord-orientale et l'Amérique du Nord par un isthme de Behring souvent émergé depuis le Crétacé.

Pour les périodes plus récentes, le Quaternaire, on enregistre dans le Pacifique comme partout ailleurs une alternance de phases chaudes et moins chaudes, qui ont eu une influence notable sur la croissance des coraux, tandis que les plissements embryonnaires provoquaient une variation des courants.

Dans les régions accessibles, on constate donc une certaine permanence du Pacifique central depuis le Crétacé, mais une subsidence générale, puisque des dépôts de faible profondeur, coralliens le plus souvent, se trouvent immergés à 500, 1.000 et même 2.000 mètres pour ceux du Crétacé moyen.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE (1)

GENERALITES

Bourcart (J.). — Géographie du fond des mers, Paris, 1949.

Ewing (G. P.), Woollard (G. P.), Vine (A. C.), Worzel (J. L.). — Recent results in submarine geophysics. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 1946, v. 57, pp. 909-934.

Darwin (C.). — The structure and distribution of Coral Reefs, Londres, 1842. — On certain areas of elevation and subsidence in the Pacific and Indian Oceans as deduced from the study of coral formations. *Proc. Geol. Soc., London*, 1837, v. 2, pp. 552-554.

Dietz (R. S.). — Marine geology of northwestern Pacific : description of Japanese Bathymetric Chart 6901. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 1954, pp. 1199-1224, 2 pl.

Furon (R.). — La Paléogéographie, Paris, 1941. — Les progrès de la géographie et de la géologie sous-marines. *La Terre et la Vie*, 1950, n° 2, pp. 57-85, 9 fig. — Les problèmes de Paléoclimatologie et de Paléobiologie posés par la géologie de l'Arctide. *C. R. Soc. Biogéographie*, 1950, n° 230, pp. 13-32.

Gutenberg (B.). — Crustal layers of the continents and oceans. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 1951, v. 62, pp. 427-440, 5 fig., 1 pl.

Gutenberg (B.), Richter (C. F.). — Seismicity of the Earth, 1949, 1 v., 273 p.

Hobbs (W. H.). — Moutain growth, a study of the southwestern Pacific region *Proc. Amer. Phil. Soc.*, 1944, v. 88, pp. 221-268.

Joleaud (L.). — Paléogéographie de l'Océan Pacifique. *Mém. Soc. Biogéographie*, 1934, t. 4, pp. 9-40. Histoire paléobiogéographie de la Terre. Le peuplement des mers. *Encyclopédie française*, 1937, t. 5, section A, pp. 5.60-1 à 5.62-16, 12 fig.

Kuenen (Ph. H.). — Two Problems of marine Geology : Atolls and Canyons. *Vehr. Kön. Ned. Akad. v. Wet. Amsterdam*, 1947, D. 1.43, 69 pages.

Kuenen (Ph. H.). — Marine Geology, 1 vol., 1950.

Lacroix (A.) — La constitution lithologique des îles volcaniques de la Polynésie australe. *Mémoires Ac. Sc.*, 1927, t. 59, 82 p., 1 carte.

Marshall (P.). — Crustal movements and Geotectonics in the Pacific region. *Proc. III Pan-Pacific Congress*, Tokyo, 1927, 1929, pp. 440-443.

Shepard (F. P.). — Submarine Geology, 1 vol., 1948.

(1) Cette bibliographie sommaire ne concerne que le Pacifique central, à l'exclusion des grands archipels de l'Ouest et des côtes. Elle est essentiellement destinée à faciliter la recherche de la documentation très dispersée sur des milliers d'îles du Pacifique central.

Stearns (H. T.). — Late geologic history of the Pacific basin. *Amer. J. Sc.*, v. 243, pp. 614-626.

Tayama (R.). — Coral Reefs in the South Seas. *Bull. Japanese Hydrogr. Office*, 1952, v. II, 292 pages et appendices 1 et 2.

Umbgrove (J. H. F.). — The pulse of the Earth. 1 vol., 1947.

Washington (H. S.). — The chemistry of the Pacific Volcanoes : the limitation of our knowledge. *Special Publ. Bernice P. Bishop Museum*, 1921, n° 7, pp. 325-345.

Wiseman (J. D. H.), Ovey (C. D.). — Recent Investigations on the deep-sea floor. *Proc. Geol. Ass.*, 1950, v. 61, pp. 28-84, 3 fig., 3 pl.

MELANESIE

Bismarck (*New Britain, Le Maire Islands, New Ireland, New Hanover, Admiralty*) :

F. R. C. Reed. — Geology of the British Empire, 1949, pp. 682-685.

Schubert (R.). — Fossile Foraminiferen des Bismarcksarchipels. *Abh. k. K. Geol. Reichs.*, 1911, v. 20, h. 4, 130 pages.

Salomon (*San Christoval, Guadalcanar, Russell, Bougainville, Buka, Choiseul. Isabel, Savo, Eddystone, Treasury, Mungava*) :

Reed (F. R. C.). — Geology of the British Empire, 1949, pp. 688-691.

Frederici (G.), Sapper (K.). — Buka und Bougainville. *Mitt. Deutsc. Schutzgebiet*, 1910, v. 23, pp. 193-217.

Mawson (D.), Chapman (S.). — Lower Miocene Foraminifera on Bougainville Island. *Trans. R. Soc. Australia*, 1935, v. 50, p. 241, pl. 3.

Lever (A. W.). — Geology of the British Salomon Islands. *Geol. Mag.*, 1937, v. 74, pp. 271-277.

Nlles Hébrides. E. Aubert de la Rüe. — Contribution à l'étude géologique des Nlles Hébrides. *C. R. Ac. Sc.*, 1937, t. 204, p. 1880. — Le volcanisme aux Nlles Hébrides. *Bull. vulcanologique, Naples*, 1937, (2), t. 2, pp. 79-142, 18 pl.

R. Abrard et E. Aubert de la Rüe. — Sur l'existence du Néogène supérieur à Cycloclypeus aux îles Epi et Malekula. *C. R. Ac. Sc.*, 1937, t. 204, p. 1951. Sur la présence du Pliocène à l'île Malekula. *Ibidem*, t. 205, p. 290. Note sur les dépôts quaternaires et les récits soulevés des Nlles Hébrides. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 1938, (5), t. 8, pp. 63-66.

R. Abrard. — Fossiles néogènes et quaternaires des Nouvelles Hébrides. *Ann. Paléont.*, 1946-47, t. 36.

Mawson (D.). — The geology of the New Hebrides. *Proc. Linnean Soc. New South Wales*, 1905, v. 30, pp. 400-485, 16 pl.

Fiji. Foye (M. G.). — Geological Observations in Fiji. *Proc. Amer. Ac. Arts et Sc.*, 1918, v. 54, n° I, pp. 1-145, 40 fig.

Ladd (H. S.), Hoffmeister (J. E.). — Geology of Lau, Fiji. *Bull. Bernice P. Bishop Museum*, 1945, n° 181, 400 pages, 62 pl.

PACIFIQUE CENTRAL :

Groupe Nord : Christmas, Fanning, Marshall, Gilbert et Ellice.

Agassiz (A.). — The Atoll of Funafuti. *Report of Coral Reef Comm. Royal Soc. London*, 1904, 428 p.

Reed (F. R. C.). — Notes on Ocean Island. *Geol. Mag.*, 1903, v. 10, pp. 298-300.

Ladd (H. S.), Tracey (J. I.), Lill (G. G.). — Drilling on Bikini Atoll, Marshall Islands. *Science*, 1948, v. 107, pp. 51-55.

Emery (K. O.). — Submarine geology of Bikini Atoll. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 1946, v. 57, p. 1191.

Tracy (J. I.), Ladd (H. S.), Hoffmeister (J. E.). — Reefs of Bikini. *Ibidem*, 1948, v. 59, pp. 861-878.

Ladd (H. S.), Ingerson (Earl), Townsend (R. C.), Russell (M.), Stephenson (Kirk). — Drilling on Eniwetok Atoll, Marshall Islands. *Bull. Amer. Ass. Petrol. Geol.*, 1953, v. 37, n° 10, pp. 2257-2280.

Groupe Sud : Tonga, Samoa, Wallis et Futuna, Marquises, Tuamotou, Société (Tahiti, etc.), Gambier, Toubouai, Cook, Tonga, Rapa (Polynésie).

Stearns (H. T.). — Geology of the Wallis Islands. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 1945. v. 56, pp. 849-860.

Macdonald (G.). — Petrography of the Wallis Islands. *Ibidem*, pp. 861-872.

Lister (J. J.). — Notes on the Geology of the Tonga Islands. *Quart. J. Geol. Soc. London*, 1891, v. 59, pp. 590-617, 1 pl. — Reed (F. R. C.). — Geology British Empire, pp. 692-693.

Stearns (H. T.). — Geology of the Samoan Islands. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 1944, v. 55. pp. 1269-1332, 16 f., 8 pl. — Macdonald (G. A.). — Petrography of the Samoan Islands, *Ibidem*, pp. 1333-1362.

Chubb (L. J.). — The Geology of the Marsuesas Islands. *Publ. Bernice P. Bishop Museum*, 1930, n° 68, 71 pages.

Williams (H.). — Geology of Tahiti, Moorea and Maio. *Bull. Bernice P. Bishop Museum*, 1933, n° 105, 89 pages.

Stark (J. T.), Howland (A. L.). — Geology of Borabora, Society Isl. *Ibidem*, 1941, n° 169, 43 pages.

Chubb (L. J.), Smith (W. C.). — The Geology of the Austral or Tubuai Islands (Southern Pacific). *Quart. J. Geol. Soc. London*, 1927, n° 83, pp. 291-316, 1 pl. et 317-341.

Ranson (G.). — Observations sur les îles basses de l'Archipel des Tuamotou (Océanie française). *C. R. Ac. Sc.*, 1953, t. 236, pp. 2529-2531.

Ranson (G.). — Observations sur les îles coraliennes de l'Archipel des Tuamotou (Océanie fr.), *C. R. Soc. Géol. Fr.*, 1955, pp. 47-49.

Lacroix (A.). — Les roches alcalines de Tahïti. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 1910, (4), t. 10, pp. 91-124, 2 pl.

Marshall (P.). — The geology of Tahiti. *Trans. New Zealand Inst.*, 1914, v. 47, pp. 361-376. — Notes on the geology of Moorea and Rurutu. *Ibidem.*, 1913, v. 46, pp. 281-283.

Aberd (R.). — Contribution à l'étude géologique des îles Marquises et Gambier. *C. R. Congr. Soc. Sav.*, Dijon, 1923, pp. 127-129.

Aubert de la Rüe (E.). — La constitution géologique des îles Wallis et Futuna. *C. R. Ac. Sc.*, 1935, t. 200, pp. 328-330.

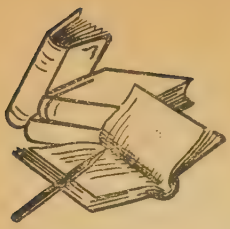
Haeberle (F. R.). — Coral Reefs of the Loyalty Islands. *Amer. J. Sc.*, 1952, v. 250, pp. 656-666.

(*Suite de la page* 306)

Malgré le grand effort qui lui est ainsi demandé, le cerveau du physiologiste ne sera jamais saturé. En effet, pour conclure sur une note optimiste, je rappellerai ce que disait mon vénéré maître Louis Lapicque :

« Chacun de nous dispose, dans son écorce cérébrale, de quelques milliards de neurones, ce qui permet des combinaisons en nombre pratiquement infini. Au cours de notre vie, nous n'en utilisons assurément qu'une bien petite partie. A tout âge, nous pouvons donc cultiver avec fruit notre merveilleux jardin. »

A.-M. Monnier.



LES LIVRES

G. BASSERAS. — Exercices et problèmes de Radioélectricité à l'usage de l'ingénieur. — Eyrolles, éditeur, Paris, 1954, 263 pages, 38 figures. Prix : 2.250 francs.

La littérature en langue française est particulièrement riche en Cours de Radioélectricité, mais bien peu d'entre eux comportent des exercices gradués permettant à l'étudiant de préciser ses connaissances. L'ouvrage de M. Basseras qui renferme un grand nombre d'exercices très intéressants vient heureusement combler cette lacune et rendra indiscutablement de grands services.

M. PARODI.

A. BLANC-LAPIERRE et M. PERROT. — La conductibilité électrique des lames métalliques minces. — Mémorial des Siences physiques, fasc. 57, Gauthier-Villars, Paris, 1954. Prix : 1.100 francs.

L'étude des propriétés des lames métalliques minces présente un grand intérêt en raison de la diversité des problèmes qu'elle pose : conductibilité électrique, photoconductivité, effet Hall, thermoélectricité, etc...

Dans le présent travail, MM. Blanc-Lapierre et Perrot se sont limités à l'étude de la conductibilité électrique des lames métalliques minces, lames qui, dans l'ensemble, ont des épaisseurs qui n'excèdent pas quelques centaines de millimicrons et qui souvent sont de l'ordre de quelques millimicrons.

Ces lames peuvent être obtenues soit par projection cathodique, soit par projection thermique, le métal étant recueilli sur un support ; le second de ces procédés permettant de travailler dans des conditions expérimentales parfaitement définies, il n'est question dans tout l'ouvrage que des propriétés des lames obtenues par cette méthode.

En huit chapitres particulièrement denses et très documentés, les auteurs, après avoir précisé les conditions expérimentales qu'exige une étude sérieuse des phénomènes, abordent successivement :

— l'évolution de la conductibilité électrique des lames minces ;
— l'influence de la température sur leur conductibilité ;
— la variation de la conductibilité en fonction du champ électrique ;
— la variation de la conductibilité avec l'épaisseur ;
— la structure des lames minces.

Le dernier chapitre est consacré à l'interprétation théorique des phénomènes.

Cet excellent exposé d'ensemble atteint certainement le but que se sont proposé ses auteurs.

M. PARODI.

H. BORG. — Théorie des circuits impulsionnels. — Collection technique du C. N. E. T., éditions de la « Revue d'Optique », Paris, 1953.

L'étude de la propagation de l'électricité dans les circuits linéaires fait l'objet de cet important ouvrage dans lequel se trouvent présentées de façon aussi rigoureuse que possible les méthodes modernes de calcul, et aussi traités de nombreux exemples complétés par d'utiles spécifications qui ne manqueront pas d'être fort prisées des praticiens.

Après avoir précisé les caractères physiques du problème, l'auteur expose au second chapitre les principes de l'Analyse harmonique avant de

passer à l'étude théorique des circuits en régime impulsionnel qui fait l'objet du troisième chapitre. Dans cette dernière partie de l'ouvrage, comme dans la suivante, un large usage est fait de la transformation de Laplace dont les propriétés essentielles sont données aux chapitres IV et VI.

L'étude de l'amplificateur video au moyen de la transformation de Laplace fait l'objet du chapitre V. Au chapitre VII sont décrites les méthodes physiques les mieux adaptées à l'étude du problème fondamental des transmissions radioélectriques.

La répartition de l'énergie dans le spectre des fréquences d'une onde modulée par impulsion est particulièrement étudiée au chapitre VIII. Le dernier chapitre comporte une étude assez poussée des servomécanismes.

Cette utile publication, comportant une importante bibliographie, sera, à n'en pas douter, très favorablement accueillie.

M. PARODI.

G. BOULIGAND et G. RABATÉ. — Initiation aux méthodes vectorielles et aux applications géométriques et dynamiques de l'analyse. — Sixième édition avec d'importants compléments. — Un vol. 322 p., Paris, 1953, Vuibert, édit., Prix : 950 francs.

La nouvelle édition de l'Initiation aux méthodes vectorielles de MM. Bouligand et Rabaté met à la disposition des élèves de propédeutiques (mathématiques spéciales et mathématiques générales des Facultés des Sciences) un instrument de travail remarquable les préparant au maniement simultané des méthodes analytiques et des méthodes vectorielles. La méthode vectorielle, d'un maniement facile, permet de dégager du cadre analytique les propriétés intrinsèques aussi bien en analyse qu'en géométrie ou en mécanique. Par de nombreux exemples, par un large choix de problèmes dont les solutions développées montrent comment les méthodes générales doivent être comprises et appliquées, M. G. Bouligand illustre la puissance et l'efficacité des méthodes vectorielles.

Après une introduction sur la méthode analytique, son esprit et sa portée, les quatre premiers chapitres exposent la théorie des vecteurs, les propriétés et les applications du produit scalaire et du produit vectoriel, la théorie des moments. Le chapitre V expose la théorie de la dérivation géométrique et son application à l'étude des courbes planes et gauches. Le chapitre VI étudie d'une façon intrinsèque les fonctions de point. Le chapitre 7 examine des problèmes d'intégration au point de vue géométrique : intégration proprement dite et étude des équations différentielles. Le chapitre 8 applique la méthode vectorielle à l'étude générale des surfaces. Le chapitre 9 traite de diverses applications cinématiques et dynamiques du calcul vectoriel.

Après un large choix d'exercices récapitulatifs, l'ouvrage est complété par une série de quinze notes constituant près d'un tiers de l'ensemble. Ces notes très intéressantes développent à l'occasion du texte diverses théories complémentaires : centre instantané de rotation, théorie des nombres complexes, cycloïdes et épicycloïdes, hélices, coniques, sur le calcul des intégrales doubles, sur la surface d'Enneper, sur les transformations en théorie des surfaces, sur la formule de Taylor en calcul vectoriel, sur divers problèmes différentiels, sur la dérivée dans une direction appliquée à des types simples d'équations aux dérivées partielles, sur une application de l'équation de Riccati, sur les trièdres, sur la formule de Stokes.

Un index final complète l'ouvrage par des renvois, non seulement à ce, volume, mais aussi à l'Initiation à l'Analyse mathématique de M. G. Bouligand.

G. PETIAU.

Edmond BRUN. — Introduction à l'étude de la couche limite. — Gauthier-Villars, Paris, 1955, 190 pages. Prix : 1.800 francs.

La couche limite est la couche de fluide qui avoisine une paroi en mouvement relatif par rapport au fluide lointain. Elle est, comme on le sait, le siège de phénomènes de transport qui permettent d'expliquer le frottement fluide, la convection, la diffusion.

Dans cet intéressant ouvrage, M. Brun présente une vue d'ensemble des phénomènes dont la couche limite est le siège, se proposant, dans un travail ultérieur, d'étudier dans le détail les phénomènes de transport.

Le rappel de notions fondamentales fait l'objet du premier chapitre ; dans les deux suivants, la couche limite est étudiée, tant du point dynamique que du point de vue thermique, dans l'hypothèse d'un fluide à propriétés physiques constantes : plaque plane dans le lit du vent ; écoulement plan ou de révolution. Le dernier chapitre est consacré à l'étude de la couche limite de diffusion.

Cet ouvrage ne manquera pas de rendre de grands services aux étudiants.

M. PARODI.

Eric BURGESS. — Frontier to space. — Préface de Sir Harold Spencer Jones. — Un vol 165 p., Chapman et Hall ltd. Edit., London, 1955. Prix : 21 sh.

L'emploi des fusées pour l'exploration de la haute atmosphère et le transport dans ces régions de véritables laboratoires automatiques prépare peut-être la conquête par l'homme des espaces interplanétaires. M. Burgess expose avec de très remarquables illustrations l'état actuel des recherches et des réalisations obtenues dans ce domaine. Après avoir passé en revue les caractéristiques et les performances réalisées par les différents types de fusées sur lesquelles le secret militaire a été levé (quelques fusées américaines, fusée Véronique française), M. Burgess montre comment ces fusées ont pu être équipées d'instruments de mesures de façon à réaliser des laboratoires automatiques extra-terrestres. Les résultats obtenus ont considérablement augmenté nos connaissances sur l'ionosphère, sur le rayonnement solaire et sur la répartition des météorites avec l'altitude.

Dans un dernier chapitre, M. Burgess examine les possibilités de réalisation d'un satellite artificiel de la terre.

G. PETIAU.

G. CAHEN. — Eléments de Calcul matriciel. — Dunod, Paris, 1955, 94 pages, 18 figures.

Dans cet opuscule se trouve la substance des leçons sur le Calcul des matrices que professe l'auteur à l'Ecole nationale du Génie maritime. Après avoir exposé avec clarté les principes de l'Algèbre des matrices en partant de la notion de transformation linéaire, M. G. Cahen termine en donnant quelques applications du calcul matriciel à l'étude des réseaux électriques.

Illustré par de nombreux exemples et par un choix excellent d'exercices, ce petit ouvrage sera certainement apprécié de tous ceux qui veulent s'initier aux méthodes de l'algèbre des tableaux ; on regrettera cependant l'absence de bibliographie.

M. PARODI.

H. CARPENTIER. — Lignes électriques T. H. T. Etude mécanique et construction des lignes aériennes. — Eyrolles, Paris, 1955, 250 pages, 85 figures, 19 planches. Prix, relié : 4.800 francs.

L'ouvrage de M. Carpentier constitue un très utile précis des connaissances indispensables à l'ingénieur projeteur ou constructeur de lignes ; il fournit tous les éléments nécessaires à cet effet. L'auteur qui possède des connaissances mathématiques étendues, a su exposer d'une façon extrême-

ment claire et précise tous les problèmes que pose l'étude des grands transports d'énergie. Tous les ingénieurs ayant à étudier ou à réaliser des lignes de transmission d'énergie électrique trouveront dans le livre de M. Carpentier, en même temps qu'une précieuse documentation, toutes les directives désirables tant au point de vue technique qu'au point de vue économique.

H. PARODI.

P. CAZAL. — La masse sanguine et sa pathologie. Troubles de la volémie et chocs. — Un vol. relié (16 × 24) de 328 p., 92 fig., Masson et Cie, 120, boulevard Saint-Germain, Paris, 1955. Prix : 2.400 francs.

Le professeur P. Cazal a décidé de rédiger un Traité d'Hématologie conforme au programme du Certificat d'Etudes spéciales d'Hématologie de la Faculté de Médecine de Montpellier. Il comprendra six tomes, dont le premier vient de paraître ; il est consacré à l'ensemble du sang circulant considéré comme un organe de dimensions macroscopiques.

Les propriétés physiques et chimiques envisagées sous l'angle intéressant l'hématologie (densité, viscosité, stabilité, volume, constituants hydrominéraux, protéines) sont analysées avec description des techniques permettant cette étude.

Un rappel de l'hémodynamique au comportement du sang dans l'appareil circulatoire, permettra de mieux comprendre les troubles de la masse sanguine, les chocs qu'ils déterminent et les traitements indispensables.

La partie la plus importante du volume traite de la pathologie quantitative de la masse sanguine, c'est-à-dire des troubles de la volémie (pléthores sanguines, hypovolémie...) et de la thérapeutique des chocs qui résultent des variation de la volémie. La transfusion est une thérapeutique merveilleuse des hypovolémies, à condition qu'elle soit pratiquée avec discernement et en oubliant d'anciens « mythes transfusionnels ». Les brûlures constituent la cause la plus importante des plasmorragies ; le traitement comprend en premier des transfusions plasmatiques.

Ce volume est plus particulièrement destiné aux hématologistes, aux transfuseurs, aux hématothérapeutes, aux chirurgiens. Les faits sont présentés et groupés d'une façon originale ; c'est une sorte de vue d'ensemble, de synthèse de l'hématologie moderne et des applications pratiques qui en découlent.

A. TÉTRY.

A. COLOMBANI. — Propriétés des lames métalliques minces. — Mémorial des Sciences physiques, fascicule 58, Gauthier-Villars, Paris, 1954, 76 pages, 32 figures. Prix : 1.000 francs.

M. Colombani, dont les travaux sur le sujet sont bien connus, présente dans cet important travail, une mise au point particulièrement documentée, des propriétés des lames métalliques minces.

Successivement sont étudiées les propriétés magnétiques des dépôts électrolytiques, celles des dépôts obtenus par évaporation thermique, enfin les particularités des dépôts réalisés par pulvérisation cathodique.

Les travaux théoriques de Klein et Smith sont exposés dans le détail et confrontés avec les faits expérimentaux, comme ceux de Kittel.

Cette utile mise au point ne manquera pas d'être appréciée des spécialistes.

M. PARODI.

The Collected papers of Peter J. W. DEBYE. Interscience publishers, New-York.

Dans cet important ouvrage de près de 700 pages, se trouvent rassemblées les publications les plus marquantes de l'illustre physicien.

Précédés d'une bibliographie, due à R. M. Fuoss, de P. J. W. Debye, ainsi que d'une analyse d'ensemble des travaux de ce dernier, les mémoires de Debye se trouvent répartis entre cinq grandes rubriques : Diffraction des rayons X ; moments dipolaires ; électrolytes ; diffraction de la lumière ; travaux divers.

Il est heureux de voir ainsi réunis les travaux de l'un des théoriciens de la Physique qui ont le plus contribués au progrès de la Science.

M. PARODI.

ELSEVIER. — Dictionnaire de télévision, radar et antennes. — VIII, 760 p. (16 × 25). Relié toile. Dunod, Paris, 1955. Prix : 5.800 francs.

Ce précieux instrument mis à la disposition des techniciens présente en six langues (allemand, anglais, espagnol, français, italien, hollandais) les termes usités dans les applications de l'électronique. A une première partie, qui comporte une table-code où chaque mot, défini en anglais, est accompagné sur la même ligne de ses traductions dans les cinq autres langues, succèdent cinq listes alphabétiques (une pour chaque langue) renvoyant par numérotage au mot correspondant de la table-code.

Conformément au même principe, seront établis les autres dictionnaires techniques de la collection.

G. BOULIGAND.

F. I. FRANKL et E. A. KARPOVICH. — Gas Dynamics of thin bodies. — Traduit du russe en anglais par M. D. Friedman. — Un vol., 175 p., Interscience Publishers Inc., édit., London and New York. Prix : 5,75 $.

Cette monographie expose la théorie mathématique de l'écoulement des gaz compressibles autour des corps minces aux vitesses soussoniques et supersoniques, principalement d'après les travaux des mathématiciens soviétiques.

Le premier chapitre rappelle l'historique du développement de la théorie de l'écoulement des gaz compressibles autour des corps de dimensions finies et les propriétés de la solution de l'équation des ondes représentée par le potentiel retardé.

Le chapitre 2 traite rigoureusement et d'une façon très détaillée l'écoulement d'un fluide compressible autour d'un corps de révolution aux vitesses soussoniques et supersoniques.

Le chapitre 3 passe en revue les principaux travaux sur la théorie des ailes en écoulement stationnaire par la théorie dite linéarisée. La méthode de Mme E. A. Krasilschikova pour la théorie de l'écoulement supersonique autour d'une aile de forme quelconque est notamment exposée en détail.

Le chapitre 4 examine la théorie de l'écoulement non stationnaire autour des ailes aux vitesses soussoniques et supersoniques (E. A. Krasilschikova) et ses applications à la théorie de l'écoulement autour des pales d'hélices.

Le chapitre 5 expose la théorie de l'écoulement conique et ses généralisations, notamment les travaux de Smirnov et de Sobolev, de Busemann, de Gurevich, la méthode de Hayes et la méthode de Khaskind-Falkovich-Gurevich pour l'étude des oscillations des ailes dans les écoulements supersoniques.

G. PETIAU.

Le Gérant : R. CONSTANS.

Imprimerie Jacques et Demontrond, Besançon.